



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MULTIOBJETIVO PARA LA GESTIÓN DE ACTIVOS DE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE TERRESTRE

CRISTINA TORRES MACHÍ

Tesis para optar al grado de

Doctor en Ciencias de la Ingeniería por Pontificia Universidad Católica de Chile

Doctor por Universitat Politècnica de València

Profesores Supervisores:

MARCELA ALONDRA CHAMORRO GINÉ

EUGENIO PELLICER ARMIÑANA

VÍCTOR YEPES PIQUERAS

Enero 2015



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MULTIOBJETIVO PARA LA GESTIÓN DE ACTIVOS DE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE TERRESTRE

CRISTINA TORRES MACHÍ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

MARCELA ALONDRA CHAMORRO

EUGENIO PELLICER ARMIÑANA

VÍCTOR YEPES PIQUERAS

KEITH MOLENAAR

RAFAEL MARTÍ

ALFREDO GARCÍA

LUIS FERNANDO ALARCÓN

Para completar las exigencias del grado de

Doctor en Ciencias de la Ingeniería por Pontificia Universidad Católica de Chile

Doctor por la Universitat Politècnica de València

Santiago de Chile, enero, 2015

*A Alejandro, por su apoyo y ánimo
incondicionales*

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría empezar estas palabras de agradecimiento reconociendo la ayuda prestada por mis directores de tesis. Mi más sincero agradecimiento a la profesora Alondra Chamorro por su guía y apoyo. Trabajar con ella ha sido una experiencia muy valiosa, tanto a nivel personal como profesional, por la que siempre le estaré agradecida. Así mismo, me gustaría expresar mi gratitud a los profesores Eugenio Pellicer y Víctor Yepes. Gracias por vuestro asesoramiento y sugerencias en el desarrollo de este trabajo.

Quiero extender este agradecimiento al equipo e instituciones asociadas en el proyecto Fondef D09I1018 “Investigación y desarrollo de soluciones para la gestión de pavimentos urbanos en Chile”. Sirvan estas líneas para agradecer a los profesores Susan Tighe, Carlos Videla y Claudio Mourgues; así como a Pablo Godoy, Carolina Videla y Agnes Dekock. Sus contribuciones han sido muy enriquecedoras para el desarrollo de este trabajo. Dentro del equipo Fondef, me gustaría agradecer especialmente a Alelí Osorio por su amistad y los momentos que hemos compartido.

Aprovecho estas líneas para agradecer la amabilidad, generosidad y cariño con la que he sido acogida durante mis estancias en Chile. Al personal del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile; a los compañeros de la sala de doctorado; a las chicas de la CAV y a Alejandro Rodríguez. Gracias por hacerme sentir en casa a pesar de la distancia.

Deseo resaltar el apoyo recibido por mis compañeros de la Unidad Docente de Proyectos y del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de València.

Así mismo, me gustaría agradecer a los evaluadores que han participado en la revisión del documento. Los comentarios y sugerencias recibidas me han sido de mucha ayuda para mejorar la versión final de este trabajo de investigación.

También desearía agradecer la financiación recibida por el gobierno de Chile a través de la beca de doctorado nacional para extranjeros (CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2013-63130138). Así mismo, me gustaría expresar mi agradecimiento a Santander Universidades por su ayuda dentro del programa “Becas Iberoamérica Jóvenes Profesores e Investigadores”.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer a mi familia por su comprensión y cariño. Espero poder recuperar el tiempo que esta tesis os ha robado y los momentos en los que sólo he podido estar a través de Skype. Sin vuestro apoyo, no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	12
RESUM	14
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	16
NOTACIÓN	17
1 INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 Planteamiento del Problema.....	19
1.2 Punto de Partida de la Investigación	34
1.3 Objetivos	35
1.4 Hipótesis.....	36
1.5 Alcance.....	37
1.6 Método de Investigación	41
1.7 Organización de la Tesis	45
2 LA TOMA DE DECISIÓN EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS.....	47
2.1 Evaluación de Alternativas de Conservación.....	48
2.2 Optimización para la Asignación de Recursos de Conservación	74
2.3 Limitaciones y Oportunidades de Mejora	100

3	HERRAMIENTA PARA LA OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MULTIOBJETIVO EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS	103
3.1	Definición del Problema de Optimización	104
3.2	Diseño Conceptual de la Herramienta de Optimización	110
3.3	Consideraciones para la Aplicación de Algoritmos Heurísticos	113
3.4	Características de los Algoritmos de Optimización Heurística.....	117
4	APLICACIÓN DE ALGORITMOS HEURÍSTICOS MONOBJETIVO A CASO DE ESTUDIO: LA GESTIÓN DE REDES DE PAVIMENTOS URBANOS	139
4.1	Particularidades de la Gestión de Pavimentos Urbanos	140
4.2	Parámetros del Problema de Optimización	143
4.3	Aplicación Monobjetivo de los Algoritmos Heurísticos.....	171
4.4	Discusión y Conclusiones Derivadas de la Optimización Monobjetivo	188
5	DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN ALGORITMO HÍBRIDO MULTIOBJETIVO PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE	190
5.1	Algoritmo Híbrido Multiobjetivo Basado en GRASP y GLS.....	191
5.2	Calibración del Algoritmo Híbrido Propuesto	197
5.3	Validación del Algoritmo Híbrido	205
5.4	Optimización Multiobjetivo	209
5.5	Estudio de Sensibilidad a las Restricciones Presupuestarias	222
5.6	Discusión y Conclusiones Derivadas de la Optimización Multiobjetivo	230
6	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	235
6.1	Cumplimiento de los Objetivos de la Investigación.....	235
6.2	Conclusiones de la Investigación	239
6.3	Recomendaciones Prácticas	242
6.4	Limitaciones	244
6.5	Futuras Líneas de Investigación.....	246
7	RESUMEN EXTENDIDO EN INGLÉS (Incluidas conclusiones).....	249
7.1	Background	249
7.2	Objectives.....	251
7.3	Hypotheses	253

7.4	Scope of the study	253
7.5	Research Method.....	256
7.6	Conclusions, Recommendations and Future Research	258
8	REFERENCIAS	269
A N E X O S.....		283
Anexo A: Conceptos básicos de la evaluación económica		284
Anexo B: Formulación matemática de indicadores económicos		289
Anexo C: Idoneidad de un indicador basado en efectividad para el caso de estudio.....		290
Anexo D: Ajuste del incremento de vida en servicio de los tratamientos.....		300
Anexo E: Impacto ambiental de la aplicación de tareas de conservación.....		305
Anexo F: Código para designar tratamientos en programas de conservación		307
Anexo G: Escenario presupuestario base para la conservación de la red de estudio.....		308
Anexo H: Resultados de la calibración de heurísticas		311
Anexo I: Resultados de la calibración de la heurística híbrida		323
Anexo J: Datos de inventario y resultados de validación del algoritmo híbrido.....		328
Anexo K: Soluciones óptimas obtenidas en la aplicación multiobjetivo		343
Anexo L: Resultados del análisis de sensibilidad a restricciones presupuestarias....		349
Anexo M: Publicaciones derivadas de la investigación		351

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1: Métodos de optimización mayoritariamente empleados en los SGIs	32
Tabla 2-1: Características evaluadas en la auscultación de pavimentos	50
Tabla 2-2: Tipos de análisis económicos	58
Tabla 2-3: Criterios de decisión en la evaluación social y financiera	59
Tabla 2-4: Clasificación de tipos de análisis económico	60
Tabla 2-5: Tipos de análisis económico e indicadores aplicables	60
Tabla 2-6: Costes y beneficios incluidos en los tipos de análisis económicos	65
Tabla 2-7: Modelos de evaluación económica	66
Tabla 2-8: Análisis y conceptos considerados en modelos de evaluación económica	67
Tabla 2-9: Modelos de evaluación ambiental basados en la ISO 14040	71
Tabla 2-10: Modelos de evaluación ambiental basados en sistemas de certificación	72
Tabla 2-11: Métodos de prioridad basada en prelación	78
Tabla 2-12: Métodos de programación matemática	80
Tabla 2-13: Métodos de optimización aproximada o heurística	81
Tabla 2-14: Otros métodos considerados en la asignación de recursos	83
Tabla 2-15: Métodos de optimización y priorización en las aplicaciones revisadas .	85
Tabla 2-16: Aspectos considerados en las aplicaciones revisadas	86
Tabla 2-17: Clasificación de las técnicas de decisión multicriterio revisadas	93
Tabla 2-18: Ventajas y limitaciones de las técnicas de decisión multicriterio	97
Tabla 2-19: Técnicas multicriterio consideradas en las aplicaciones revisadas	99
Tabla 4-1: Parámetros de inventario y condición inicial de la red de estudio	145
Tabla 4-2: Tratamientos de conservación considerados en el caso de estudio	150

Tabla 4-3: Umbral de aplicación de tratamientos en pavimentos asfálticos	160
Tabla 4-4: Umbral de aplicación de tratamientos en pavimentos de hormigón.....	160
Tabla 4-5: Efecto de la aplicación de los tratamientos en pavimentos asfálticos	163
Tabla 4-6: Efecto de la aplicación de los tratamientos en pavimentos de hormigón	163
Tabla 4-7: Costes de los tratamientos en pavimentos asfálticos	165
Tabla 4-8: Costes de los tratamientos en pavimentos de hormigón.....	165
Tabla 4-9: Emisiones de CO ₂ de los tratamientos en pavimentos asfálticos	167
Tabla 4-10: Emisiones de CO ₂ de los tratamientos en pavimentos de hormigón	167
Tabla 4-11: Características de la solución óptima con GFB.....	174
Tabla 4-12: Características de la solución óptima con TA	177
Tabla 4-13: Características de la solución óptima con SA.....	180
Tabla 4-14: Características de la solución óptima con GRASP	183
Tabla 4-15: Calibración del parámetro probabilístico y GFB en GRASP	186
Tabla 5-1: Calibración del parámetro λ del algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB .	199
Tabla 5-2: Calibración del parámetro probabilístico y GFB del algoritmo híbrido .	200
Tabla 5-3: Calibración del parámetro de relajación presupuestaria.....	201
Tabla 5-4: Características de la solución óptima con GRASP-GLS-GFB.....	202
Tabla 5-5: Soluciones óptimas no dominadas.....	213
Tabla 5-6: Características de las soluciones óptimas en la aplicación multiobjetivo	215
Tabla 6-1: Artículos y ponencias derivadas de la investigación	237

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Deterioro del pavimento con el transcurso del tiempo.....	21
Figura 1-2: Fases del ciclo de vida de una infraestructura.....	22
Figura 1-3: Estado de los firmes de carreteras españolas.....	24
Figura 1-4: Detalle de la información considerada en distintos niveles de decisión .	25
Figura 1-5: Componentes de un SGI genérico	27
Figura 1-6: Aspectos a considerar en la gestión sostenible de infraestructura.....	29
Figura 1-7: Soluciones al problema de asignación de recursos	32
Figura 1-8: Limitaciones identificadas en la toma de decisión para la gestión de activos y relación con los objetivos e hipótesis de la investigación	37
Figura 1-9: Método de investigación	44
Figura 2-1: Aspectos abordados en la revisión del estado del arte	47
Figura 2-2: Curva de comportamiento de una infraestructura	54
Figura 2-3: Efectividad de un programa de conservación.....	62
Figura 2-4: Enfoques secuencial y holístico en la asignación de recursos.....	75
Figura 2-5: Clasificación general de métodos en la toma de decisión multicriterio ..	89
Figura 2-6: Definición de frontera de Pareto	91
Figura 3-1: Marco conceptual de la herramienta de optimización.....	112
Figura 3-2: Ejemplo de un movimiento de tres variables	113
Figura 3-3: Función de penalización técnica a un activo n de la red	116
Figura 3-4: Función de penalización económica.....	117
Figura 3-5: Clasificación de algoritmos de optimización heurística.....	118
Figura 3-6: Recorrido en una búsqueda por gradiente que minimiza f	119

Figura 3-7: Resultados obtenidos con criterio de primer o mayor descenso	120
Figura 3-8: Diagrama de flujo de la heurística GFB.....	121
Figura 3-9: Factorial para calibración de la heurística GFB	123
Figura 3-10: Diagrama de flujo de la heurística TA	124
Figura 3-11: Criterio de reducción del umbral de aceptación.....	125
Figura 3-12: Factorial para calibración de la Aceptación por Umbrales	126
Figura 3-13: Diagrama de flujo de la heurística SA.....	127
Figura 3-14: Diagrama de flujo para la determinación de la temperatura inicial	129
Figura 3-15: Factorial para calibración del SA	131
Figura 3-16: Diagrama de flujo de la heurística GRASP	132
Figura 3-17: Efecto de aplicar el tratamiento s_n en el año t evaluado con GRASP	134
Figura 3-18: Factorial de calibración del parámetro probabilístico en GRASP	137
Figura 4-1: Red urbana de la comuna de Macul (Santiago).....	144
Figura 4-2: Curvas de deterioro para pavimentos asfálticos	147
Figura 4-3: Curvas de deterioro para pavimentos de hormigón.....	148
Figura 4-4: Rango de aplicación de tratamientos en función de la condición	159
Figura 4-5: Umbrales de aplicación de tratamientos y efecto de su aplicación	161
Figura 4-6: Calibración del tipo de movimiento en GFB.....	172
Figura 4-7: Valores máximos con movimientos libres obtenidos con GFB	173
Figura 4-8: Flujo de costes anuales del programa óptimo GFB.....	175
Figura 4-9: Condición media de la red con GFB y el caso base	175
Figura 4-10: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con GFB	176
Figura 4-11: Flujo de costes anuales del programa óptimo TA	178
Figura 4-12: Condición media de la red con TA y el caso base.....	178

Figura 4-13: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con TA	179
Figura 4-14: Calibración del número de cadenas de Markov en SA	180
Figura 4-15: Flujo de costes anuales del programa óptimo SA	181
Figura 4-16: Condición media de la red con SA y el caso base.....	182
Figura 4-17: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con SA.....	182
Figura 4-18: Flujo de costes anuales del programa óptimo GRASP.....	184
Figura 4-19: Condición media de la red con GRASP y el caso base.....	185
Figura 4-20: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con GRASP.....	185
Figura 5-1: Conceptos considerados en la función voraz con GRASP-GLS-GFB..	195
Figura 5-2: Factorial de calibración parámetro de penalización en GLS.....	198
Figura 5-3: Factorial de calibración del parámetro de relajación presupuestaria	199
Figura 5-4: Flujo de costes anuales del programa óptimo GRASP-GLS-GFB.....	203
Figura 5-5: Condición media de la red con GRASP-GLS-GFB y caso base.....	203
Figura 5-6: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con GRASP-GLS-GFB..	204
Figura 5-7: Diseño experimental para la validación del algoritmo híbrido	206
Figura 5-8: Resultados de la validación de la heurística híbrida.....	207
Figura 5-9: Familia de soluciones resultantes de la aplicación multiobjetivo	211
Figura 5-10: Soluciones óptimas no dominadas	214
Figura 5-11: Efectividad de los programas óptimos multiobjetivo y el caso base...	216
Figura 5-12: Condición media de la red de programas óptimos y caso base.....	217
Figura 5-13: Emisiones de los programas óptimos multiobjetivo y el caso base	217
Figura 5-14: Tipo de tratamiento empleado en los programas óptimos.....	218
Figura 5-15: Tratamientos de preservación óptimos en pavimentos asfálticos	220
Figura 5-16: Tratamientos de mantenimiento óptimos en pavimentos asfálticos....	221

Figura 5-17: Tratamientos de mantenimiento óptimos en pavimentos de hormigón	221
Figura 5-18: Escenarios presupuestarios con variación porcentual del presupuesto	222
Figura 5-19: Escenarios presupuestarios con distinta distribución temporal.....	223
Figura 5-20: Soluciones no dominadas con variaciones porcentuales del presupuesto	225
Figura 5-21: Variación de la efectividad con el presupuesto disponible	226
Figura 5-22: Variación de las emisiones con el presupuesto disponible.....	227
Figura 5-23: Efectividad en escenarios con variación temporal del presupuesto	229
Figura 5-24: Emisiones en escenarios con variación temporal del presupuesto	230
Figura 6-1: Contribuciones del trabajo y relación con las lagunas, hipótesis y objetivos de la investigación	241

RESUMEN

A pesar de la importancia de las infraestructuras en el desarrollo económico y social, los recursos disponibles para su conservación suelen ser insuficientes, generando un deterioro acelerado de las mismas. En este contexto surge la disciplina de gestión de activos de infraestructura, que busca optimizar la asignación de recursos para la gestión, operación y conservación de la infraestructura mediante un análisis de su ciclo de vida.

Los criterios tradicionalmente empleados para evaluar las alternativas de conservación han sido los técnicos y económicos. Si bien, recientemente, se han realizado esfuerzos para cuantificar el impacto ambiental; los modelos actuales carecen de un enfoque integrado. Surge así la oportunidad de desarrollar una evaluación sostenible que integre los aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura.

En relación a la asignación óptima de recursos, los métodos mayoritariamente empleados son los de programación matemática y los métodos de optimización aproximada. Dentro de estos últimos, las aplicaciones de algoritmos heurísticos resultan escasas, limitándose a resolver el problema a nivel de proyecto. Estos métodos, sin embargo, han sido exitosamente aplicados para resolver problemas de optimización combinatoria en otros campos de investigación. A esto hay que añadir que las aplicaciones desarrolladas se centran, mayoritariamente, en la optimización de un único objetivo; obviando la naturaleza multiobjetivo del problema real. Se detecta, por tanto, la oportunidad de desarrollar una herramienta de optimización heurística multiobjetivo que, considerando una evaluación sostenible de alternativas, mejore la asignación actual de recursos.

A la vista de estos antecedentes, el objetivo principal de esta investigación consiste en desarrollar una herramienta para la evaluación de alternativas de conservación y la optimización heurística multiobjetivo, que permita una asignación más sostenible y eficiente de los recursos disponibles para la conservación de redes de activos de infraestructura de transporte terrestre. La herramienta propuesta se aplica a un caso de estudio real que consiste en la gestión de una red de pavimentos urbanos en Chile.

De la aplicación de la herramienta de optimización al caso de estudio se concluye que los algoritmos heurísticos basados en búsquedas por entornos resultan poco eficientes para resolver el problema de asignación de recursos de conservación. Ante esta limitación, se desarrolla un nuevo método híbrido que considera los algoritmos GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), GLS (*Guided Local Search*) y GFB (*Greedy First Best*). Además, el método propuesto permite evaluar las alternativas de conservación considerando, de forma integrada, criterios técnicos, económicos y ambientales.

El algoritmo híbrido propuesto diseña programas de conservación con una efectividad media un 9% superior a la obtenida con el algoritmo de búsqueda por entornos más eficaz, requiriendo para ello un menor esfuerzo computacional. En la aplicación al caso de estudio chileno, se observa que el algoritmo híbrido mejora la gestión actual, aumentando en un 22% la condición media de la red y reduciendo, además, las emisiones de CO₂ en un 12%.

En términos prácticos, los programas óptimos consideran una política proactiva, en la que los pavimentos se tratan cuando la condición de los mismos aún es buena. Por último, la herramienta propuesta mejora la planificación temporal de los recursos. En base a las evidencias demostradas en el caso de estudio, se concluye que la distribución temporal del presupuesto es un factor clave en el desempeño técnico y ambiental de la red.

Palabras Clave: Sostenibilidad; sustentabilidad; análisis del ciclo de vida; gestión de infraestructura; conservación; preservación.

ABSTRACT

Despite the importance of infrastructure in economic and social development, available funds for their maintenance are often insufficient, leading to a rapid deterioration. In this context arises the discipline of infrastructure asset management. By combining engineering principles with business practices and economic theory, infrastructure asset management enables an optimal resource allocation for the operation of infrastructure over its lifecycle.

Traditionally, the evaluation of maintenance alternatives has been focused in economic and technical terms. Recent efforts have been made to quantify the environmental impact of these activities. However, current models lack of an integrated evaluation. This limitation creates the need to develop a sustainable evaluation of maintenance alternatives that integer technical, economic and environmental aspects over the infrastructure life-cycle.

With respect to the allocation of maintenance funds, optimization methods mainly used are mathematical programming and near-optimization methods. Regarding near-optimization methods, too little attention has been paid to heuristic algorithms, which so far have only been applied to solve the problem at the project level. In addition, optimization applications in infrastructure management are mainly focused on one objective, ignoring thus the complex and multi-objective nature of the real problem. There is an opportunity to develop a heuristic multi-objective optimization tool that, considering a sustainable evaluation of alternatives, improves the current allocation of maintenance resources.

In view of this background, the main objective of this research is to develop a tool for the sustainable evaluation of maintenance alternatives and the multi-objective heuristic optimization. This tool enables a more sustainable and efficient allocation of available resources for the maintenance of infrastructure at the network level. This tool is applied to a case study dealing with the management of an urban pavement network in Chile.

This research concludes that the heuristic algorithms based on local search heuristics are inefficient to solve the budget allocation problem. Given this limitation, a new hybrid method is developed. It combines GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), GLS (*Guided Local Search*) and GFB (*Greedy First Best*) algorithms.

Moreover, it evaluates the maintenance alternatives considering, in an integrated manner, technical, economic and environmental aspects.

The proposed hybrid algorithm results in maintenance programs with an average effectiveness that is 9% higher than the one obtained with local search heuristics. The hybrid algorithm also requires in this process a lower computational effort. The application of the optimization tool to the Chilean case study improves the current management of urban pavements. The average network condition is 22% higher than the one obtained under the current practices and the generated CO₂ emissions are reduced in 12%.

In practical terms, optimal programs consider a proactive maintenance policy. This policy applies preservation treatments when the pavement condition is still good. Finally, the optimization tool produces in this research enables a better planning of maintenance funds over time. Based on the evidence demonstrated by the Chilean case study, it is concluded that the funding level over time is a key factor in the technical and environmental performance of the network.

Keywords: Sustainability; life-cycle analysis; infrastructure management; maintenance; preservation.

RESUM

A pesar de la importància de les infraestructures en el desenrotllament econòmic i social, els recursos disponibles per a la seua conservació solen ser insuficients, generant un deteriorament accelerat de les mateixes. En este context sorgix la disciplina de gestió d'actius d'infraestructura, que busca optimitzar l'assignació de recursos per a la gestió, operació i conservació de la infraestructura per mitjà d'una anàlisi del seu cicle de vida.

Els criteris tradicionalment emprats per a avaluar les alternatives de conservació han sigut els tècnics i econòmics. Si bé, recentment, s'han realitzat esforços per a quantificar l'impacte ambiental; els models actuals no tenen un enfocament integrat. Sorgix així l'oportunitat de desenrotllar una avaluació sostenible que integre els aspectes tècnics, econòmics i ambientals en el cicle de vida de la infraestructura.

En relació a l'assignació òptima de recursos, els mètodes majoritàriament emprats són els de programació matemàtica i els mètodes d'optimització aproximada. Dins d'estos últims, les aplicacions d'algoritmes heurístics resulten escasses, limitant-se a resoldre el problema a nivell de projecte. Estos mètodes, no obstant això, han sigut reeixidament aplicats per a resoldre problemes d'optimització combinatòria en altres camps d'investigació. A açò cal afegir que les aplicacions desenrotllades se centren, majoritàriament, en l'optimització d'un únic objectiu; obviant la naturalesa multiobjectivo del problema real. Es detecta, per tant, l'oportunitat de desenrotllar una ferramenta d'optimització heurística multiobjectivo que, considerant una avaluació sostenible d'alternatives, millore l'assignació actual de recursos.

A la vista d'estos antecedents, l'objectiu principal d'esta investigació consistix a desenrotllar una ferramenta per a l'avaluació d'alternatives de conservació i l'optimització heurística multiobjectivo, que permeta una assignació més sostenible i eficient dels recursos disponibles per a la conservació de xarxes d'actius d'infraestructura de transport terrestre. La ferramenta proposada s'aplica a un cas d'estudi real que consistix en la gestió d'una xarxa de paviments urbans a Xile.

De l'aplicació de la ferramenta d'optimització al cas d'estudi es conclou que els algoritmes heurístics basats en busques per entorns resulten poc eficients per a resoldre el problema

d'assignació de recursos de conservació. Davant d'esta limitació, es desenrotlla un nou mètode híbrid que considera els algoritmes GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), GLS (*Guided Local Search*) i GFB (*Greedy First Best*). A més, el mètode proposat permet avaluar les alternatives de conservació considerant, de forma integrada, criteris tècnics, econòmics i ambientals.

L'algoritme híbrid proposat dissenya programes de conservació amb una efectivitat mitjana un 9% superior a l'obtinguda amb l'algoritme de busca per entorns més eficaços, requerint per a això un menor esforç computacional. En l'aplicació al cas d'estudi xilé, s'observa que l'algoritme híbrid millora la gestió actual, augmentant en un 22% la condició mitjana de la xarxa i reduint, a més, les emissions de CO₂ en un 12%.

En termes pràctics, els programes òptims consideren una política proactiva, en la que els paviments es tracten quan la condició dels mateixos encara és bona. Finalment, la ferramenta proposada millora la planificació temporal dels recursos. Basant-se en les evidències demostrades en el cas d'estudi, es conclou que la distribució temporal del pressupost és un factor clau en l'exercici tècnic i ambiental de la xarxa.

Paraules Clau: Sostenibilitat; anàlisi del ciclo de vida; gestió d'infraestructura; conservació; preservació.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACB	Análisis Coste-Beneficio
ACE	Análisis Coste-Efectividad
ACCV o LCCA	Análisis del Coste del Ciclo de Vida (<i>Life Cycle Cost Analysis</i>)
ACV o LCA	Análisis del Ciclo de Vida (<i>Life Cycle Assessment</i>)
AHP	Proceso Analítico de Jerarquías (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
AIE	Análisis de Impacto Económico
AF	Análisis Financiero
CB	Coste-Beneficio
CAE	Coste Anual Equivalente
COV	Costes de Operación Vehicular
CE	Coste-Efectividad
FHWA	Administración federal de carreteras (<i>Federal Highway Administration</i>)
GFB	Algoritmo heurístico de gradiente primer descenso (<i>Greedy First Best</i>)
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
GLS	Búsqueda Local Guiada (<i>Guided Local Search</i>)
ICPU	Índice de Condición de Pavimentos Urbanos
IRI	Índice de Regularidad Internacional (<i>International Roughness Index</i>)
MADM	Toma de decisión multiatributo (<i>Multi-Attribute Decision Making</i>)
MCDM	Toma de decisión multicriterio (<i>Multi-Criteria Decision Making</i>)
MODM	Toma de decisión multiobjetivo (<i>Multi-Objective Decision Making</i>)
PaLATE	<i>Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects</i>
P+M+R	Acciones de conservación que consideran actividades de preservación, mantenimiento y rehabilitación
RAP	Pavimento asfáltico reciclado (<i>Recycled Asphalt Pavement</i>)
SA	Algoritmo heurístico de recocido simulado (<i>Simulated Annealing</i>)
SGI	Sistema de Gestión de activos de Infraestructura
TA	Algoritmo heurístico de aceptación por umbrales (<i>Threshold Accepting</i>)
TIR	Tasa Interna de Retorno
TV	Tiempo de Viaje
VAN o VPN	Valor Actual Neto o Valor Presente Neto

NOTACIÓN

α	Parámetro de relajación presupuestaria
ABC_{max}	Efectividad máxima de un conjunto de programas de conservación
$\overline{ABC_{max}}$	Promedio de las efectividades máximas obtenidas en la optimización de un conjunto de programas de conservación
ABC_n	Efectividad del programa de conservación en el activo n
$ABC_{n, 0}$	Área bajo la curva de comportamiento en el caso de no aplicar ningún tratamiento de conservación en el activo n
ABC_{n, s_n}	Área bajo la curva de comportamiento en el caso de aplicar el tratamiento s_n en el activo n
β_{amb, s_n}	Coefficiente ambiental de la aplicación del tratamiento s_n
$B(t)$	Capacidad presupuestaria en el año t para la conservación de la red
GF_{n, s_n}	Función voraz utilizada en GRASP para evaluar la aplicación del tratamiento s_n en el activo n
i	Tasa de descuento
$I(\mathbf{x})$	Función dicotómica de caracterización de soluciones en GLS
$IC_n(t)$	Índice de condición del activo n en el año t
$IC_{min, n}$	Índice de condición mínimo exigido al activo n
$ICPU_{min, n}$	Índice de condición de pavimentos urbanos mínimo exigido al activo n
$k1_{tec}$ y $k2_{tec}$	Parámetros de la función de penalización técnica
$k1_{eco}$ y $k2_{eco}$	Parámetros de la función de penalización económica
λ	Parámetro de penalización del algoritmo heurístico GLS
L_m	Longitud de la cadena de Markov en el algoritmo SA
n	Activo de la red (con $n \leq N$)
N	Número de activos considerados en la red de estudio
N_{iter}	Número total de iteraciones necesarias para alcanzar la solución óptima con un determinado algoritmo heurístico
$N_{iter Umb}$	Número de iteraciones con reducción lineal del umbral en TA
$N_{itersm, max}$	Número máximo de iteraciones sin mejora
$NCM_{sm max}$	Número máximo de cadenas de Markov sin mejoras en SA
η	Parámetro probabilístico que controla la función de probabilidad en el algoritmo GRASP
PC_{GRASP}	Programa de conservación óptimo obtenido con GRASP

PC_{GFB}	Programa de conservación óptimo obtenido con GFB
$PC_{GRASP-GLS-GFB}$	Programa de conservación óptimo obtenido con GRASP-GLS-GFB
$PF_{tec, n}$	Función de penalización asociada a la restricción técnica del activo n
$PF_{eco, n}$	Función de penalización asociada a la restricción económica en el año t
$p_{m, k}$	Probabilidad de seleccionar la alternativa m de una lista de k candidatos en la solución probabilística de soluciones con GRASP
s_n	Tratamiento de conservación a aplicar al activo n (con $s_n \in S_n$)
S_n	Número de tratamientos posibles para aplicar al activo n
t	Año de análisis (con $t \leq T$)
$t_{fallo, 0}$	Año en el cual el tramo en evaluación alcanza el valor mínimo de condición
T	Periodo de análisis
$Temp$	Temperatura que controla la aceptación de soluciones en SA
U	Umbral de aceptación de soluciones en TA
w_{amb}	Parámetro para la evaluación ambiental con el indicador de evaluación sostenible propuesto
x	Vector que define una solución del problema de optimización

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El Diccionario de la Real Academia Española (DRAE 2001) define infraestructura como el “*conjunto de elementos o servicios que se consideran necesarios para la creación y funcionamiento de una organización cualquiera*”. El Banco Interamericano de Desarrollo propone, por su parte, una definición más centrada en el ámbito de la ingeniería, considerando que la infraestructura abarca el conjunto de estructuras, equipos e instalaciones de larga vida útil que constituyen la base para la prestación de servicios a los sectores productivos y los hogares (BID 2000). Esta definición propone además, una clasificación de la infraestructura en cuatro categorías: infraestructura económica; infraestructura social; infraestructura de medioambiente, recreación y esparcimiento; e infraestructura vinculada a la información y el conocimiento (BID 2000). En base a esta clasificación, la infraestructura de transporte se enmarca (junto con la infraestructura de energía y telecomunicaciones) en la categoría de infraestructura económica (BID 2000).

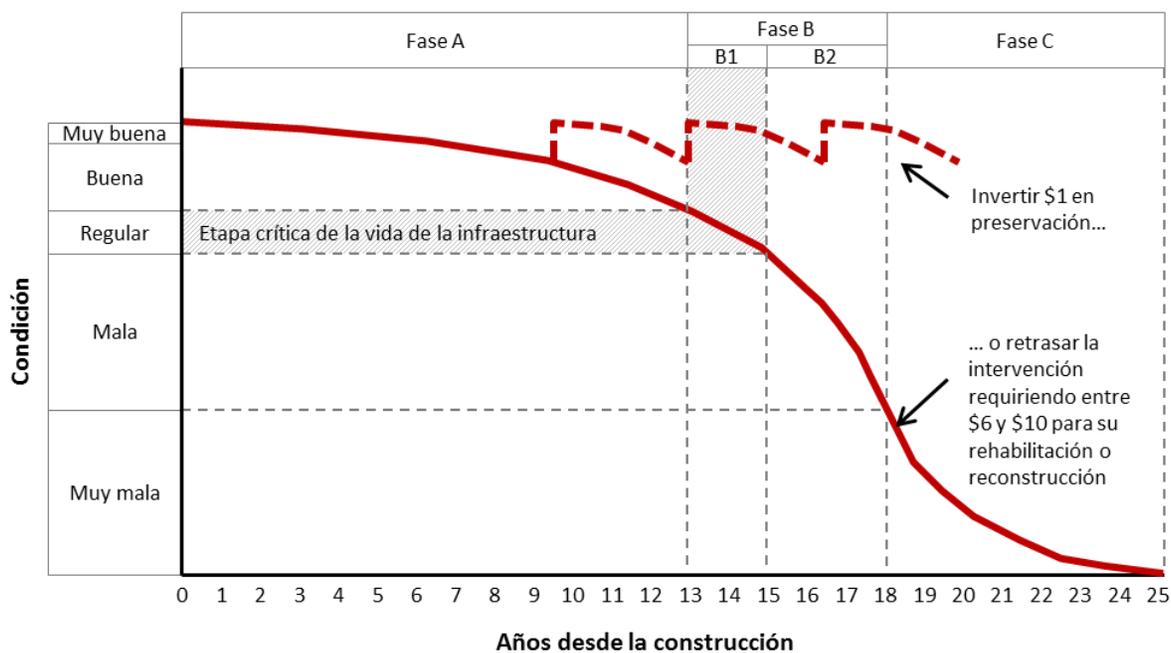
De hecho, la infraestructura de transporte terrestre y particularmente la infraestructura vial, es una pieza clave para el desarrollo económico, productividad y bienestar social de los países, constituyendo además uno de sus mayores patrimonios (Uddin et al. 2013). Es por esto que reciben también el nombre de activos de infraestructura, entendiendo como activo el “*conjunto de todos los bienes y derechos*

con valor monetario que son propiedad de una empresa, institución o individuo, y que se reflejan en su contabilidad” (DRAE 2001).

Teniendo en cuenta estas definiciones, en el presente trabajo de investigación se utilizarán, indistintamente y con el mismo significado, los conceptos de “activo de infraestructura de transporte terrestre” e “infraestructura vial”. De hecho, para una mayor sencillez en la redacción, en ocasiones se referirá a las mismas como “activos” o “infraestructuras”.

1.1.1 El deterioro de la infraestructura vial

Dada la importancia de la infraestructura vial para el desarrollo de los países y a los beneficios económicos derivados de su construcción (Queiroz et al. 1994), los principales esfuerzos de los gobiernos en décadas pasadas se centraron en la ampliación de su red. Sin embargo, a contar desde su construcción, la infraestructura comienza a deteriorarse debido a las solicitaciones directas (ej. tránsito) e indirectas (ej. clima) a las que está sometida. En este deterioro se identifican tres fases (Figura 1-1): una fase inicial con un deterioro lento y poco visible (Fase A); una fase de deterioro acelerado en la que la infraestructura resiste cada vez menos el tránsito (Fase B); y una fase final de descomposición total (Fase C).



FUENTE: Adaptado de Schliesser y Bull (1992) y CSCE et al. (2012)

Figura 1-1: Deterioro del pavimento con el transcurso del tiempo

El deterioro de la infraestructura no es lineal en el tiempo, existiendo etapas críticas en las que deben tomarse medidas correctoras. Así, al inicio de la fase B (B1 en la Figura 1-1), se detectan fallos menores en superficie. Si no se realizan operaciones de conservación, estos daños pronto comienzan a extenderse, afectando a la estructura básica (B2 en la Figura 1-1) y requiriendo intervenciones de mayor intensidad y, por tanto, mayores costes. Se entiende por conservación aquellas actividades realizadas después de la construcción de la infraestructura con el objetivo de “mantener o cuidar su permanencia” (DRAE 2001). En este concepto se incluyen las tareas de preservación, mantenimiento y rehabilitación (P+M+R), las cuales difieren en la intensidad y nivel de deterioro que pueden reparar tras su aplicación.

El momento en el que aplican las acciones de conservación resulta, por tanto, un factor clave tanto en términos técnicos como económicos. Así, en el caso de pavimentos, se estima que su conservación tardía aumenta entre seis y diez veces los costes de los tratamientos necesarios para mejorar su condición (Figura 1-1) (CSCE et al. 2012). Los sobrecostes derivados de una conservación tardía se refleja también en los usuarios, que ven triplicados sus costes de circulación (Geoffroy 1996).

Resulta por tanto necesario un enfoque a largo plazo que considere los efectos, tanto presentes como futuros, de las actuaciones realizadas a lo largo de la vida útil de la infraestructura. Surge así el concepto de análisis del ciclo de vida (*Life Cycle Assessment*, LCA o ACV), el cual consiste en el estudio del comportamiento de la infraestructura considerando todas las fases de su vida útil (desde la planificación hasta el desmantelamiento). Este análisis permite considerar las cinco fases principales del ciclo de vida de una infraestructura (Pellicer et al. 2012): viabilidad, diseño, construcción, explotación y desmantelamiento (Figura 1-2).

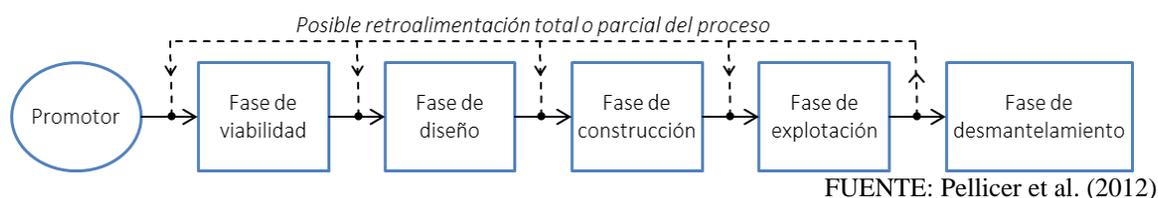


Figura 1-2: Fases del ciclo de vida de una infraestructura

1.1.2 La necesidad de una gestión de activos de infraestructura

Ante la realidad del deterioro de la infraestructura y a medida que los países van alcanzando mayores cotas de desarrollo, sus redes de transporte tienden a estabilizarse, disminuyendo la necesidad de inversión en nuevos proyectos pero aumentando, en cambio, la necesidad de inversión en conservación (Schliesser y Bull 1992; Gutiérrez-Bolivar y Achútegui 2003; NAMS 2006).

Sin embargo, estudios recientes ponen en evidencia que los niveles de inversión reales son inferiores a los requeridos, dando lugar a un deterioro acelerado de las infraestructuras (Kemp 2005; AEC 2012; ASCE 2013). Así, por ejemplo, un tercio de las principales carreteras en Estados Unidos presentan una condición de riesgo, con muchos de sus elementos cercanos al final de su vida en servicio. La necesidad anual en conservación estimada para solventar esta situación duplica la inversión actual (170 frente a 91 mil millones de dólares americanos) (ASCE 2013). En el caso europeo se identifican carencias similares. En España, por ejemplo, se viene detectando en los últimos años un deterioro continuado del estado de los pavimentos, llegando a presentar en 2011 una condición similar a la de 1985 (Figura 1-3). En el caso español, se estima necesaria una inversión de 5.500 millones de € (US\$7.000 millones). Esta necesidad contrasta con la política actual, en la que se están reduciendo los presupuestos para conservación. Así, por ejemplo, en 2012 se redujo en un 20% el presupuesto de conservación de la red estatal de carreteras (AEC 2012).

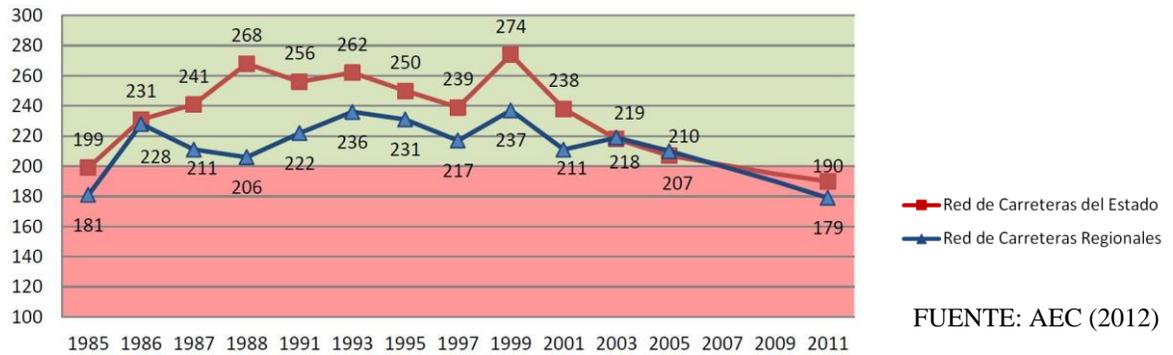


Figura 1-3: Estado de los firmes de carreteras españolas

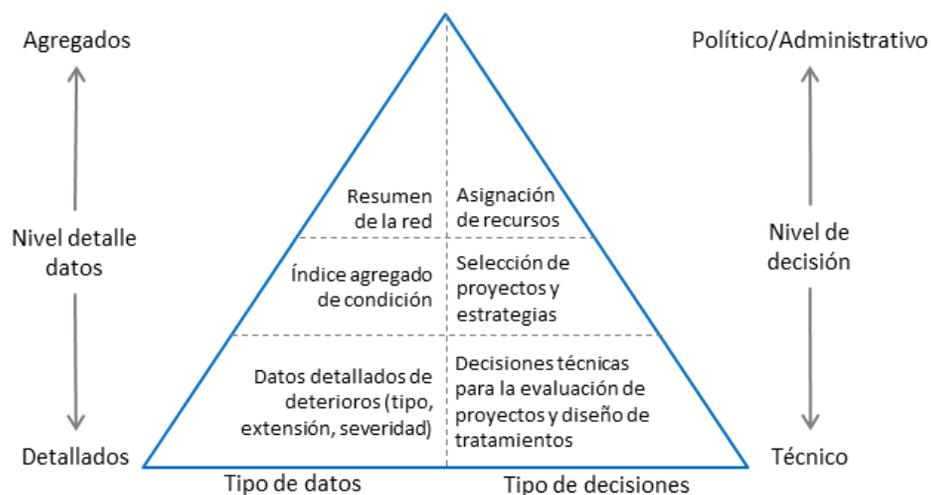
Esta necesidad de conservación también es reclamada por los usuarios, que exigen mayores niveles de seguridad, fiabilidad y confort, además de una mayor transparencia, responsabilidad y rendimiento de cuentas por parte de la administración responsable de su gestión (FHWA 1999; OECD 2001).

Ante este escenario surge la disciplina de gestión de activos de infraestructura, también conocida como gestión de infraestructura. La gestión de activos de infraestructura consiste en un proceso que, combinando conocimientos propios de la ingeniería, economía y procesos de negocio, tiene como objetivo conseguir una óptima asignación de recursos para la gestión, operación y conservación de la infraestructura mediante un análisis de su ciclo de vida (FHWA 1999; OECD 2001; NAMS 2006).

La gestión de infraestructura se basa en una planificación y programación sistemática y coordinada de las inversiones para el diseño, construcción, conservación y operación de la infraestructura. Es, por lo tanto, un proceso que abarca las actividades necesarias para proveer y mantener un nivel de servicio aceptable de la

infraestructura, que viene determinado por el gestor y/o los usuarios de la misma (Hudson et al. 1997). En el proceso de gestión de infraestructura se identifican tres niveles (de Solminihaç 2001; Kerali et al. 2006):

- Gestión a nivel de proyecto: Se toman decisiones técnicas para el diseño, construcción y conservación de una infraestructura específica.
- Gestión a nivel de red: Se analiza un conjunto de activos con el objetivo de desarrollar las prioridades y el calendario de trabajos para su conservación bajo unas restricciones presupuestarias.
- Gestión a nivel estratégico: Se establecen los objetivos generales de la gestión, las políticas de conservación y los recursos disponibles.



FUENTE: Adaptado de Haas et al. (1994)

Figura 1-4: Detalle de la información considerada en distintos niveles de decisión

Estos niveles de gestión varían en el horizonte temporal del análisis y cobertura espacial del mismo, así como en el nivel de detalle de los datos necesarios para la toma de decisiones (Figura 1-4). Sin embargo, un enfoque integrado de la gestión de

activos debe integrar los distintos niveles de gestión, garantizando así una retroalimentación de las decisiones tomadas (Uddin et al. 2013).

1.1.3 Los sistemas de gestión de infraestructura

Ante la necesidad de una gestión de activos de infraestructura, surge el desarrollo de los sistemas de gestión de infraestructura (SGI). En el concepto de SGI se consideran todos los procesos, herramientas, datos y políticas necesarios para alcanzar el objetivo de una gestión eficiente de la infraestructura (OECD 2001; NAMS 2006; Uddin et al. 2013).

El proceso llevado a cabo en un SGI genérico (Figura 1-5) puede resumirse de la siguiente manera (FHWA 1999; TAC 2013; Uddin et al. 2013). Inicialmente parte de un conjunto de datos, establecidos a nivel estratégico, en el que se definen los objetivos y políticas de la gestión así como el presupuesto disponible para la conservación. Posteriormente se recopila y analiza la información de inventario, que incluye datos sobre el uso, condición e historial de construcción y conservación. Esta información permite establecer las necesidades futuras de conservación. A partir de herramientas que evalúan el efecto de las alternativas de conservación, se lleva a cabo la asignación del presupuesto disponible de forma que se satisfagan las necesidades y requerimientos tanto de los usuarios como de la administración responsable de su gestión. Este proceso requiere que se haya definido, a nivel estratégico, el/los criterio/s a considerar en la evaluación y elección de alternativas.

Como resultado de este análisis se proponen los proyectos a implementar, los cuales son monitoreados de forma que exista una retroalimentación en el proceso de gestión.

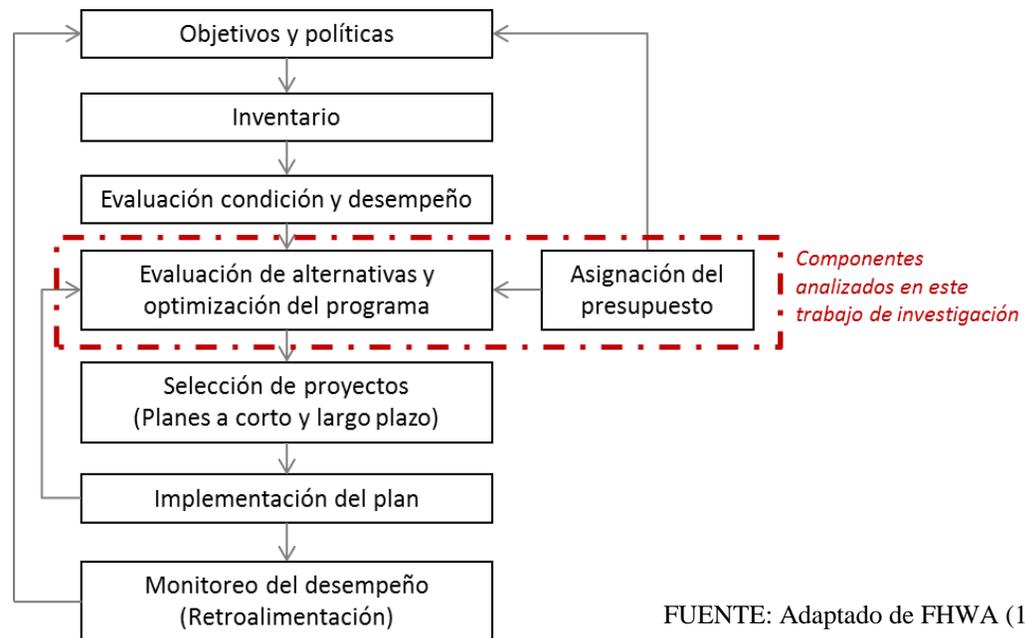


Figura 1-5: Componentes de un SGI genérico

En la Figura 1-5 se muestran los componentes necesarios para realizar este proceso, así como las relaciones existentes entre ellos. Es importante señalar que cada uno de estos componentes puede contener distintos módulos, herramientas y/o sub-procesos para llevar a cabo el proceso general de gestión (FHWA 1999). Dentro de este marco genérico de un SGI, este trabajo de investigación se centra en los componentes de asignación del presupuesto, evaluación de alternativas y optimización de los programas de conservación.

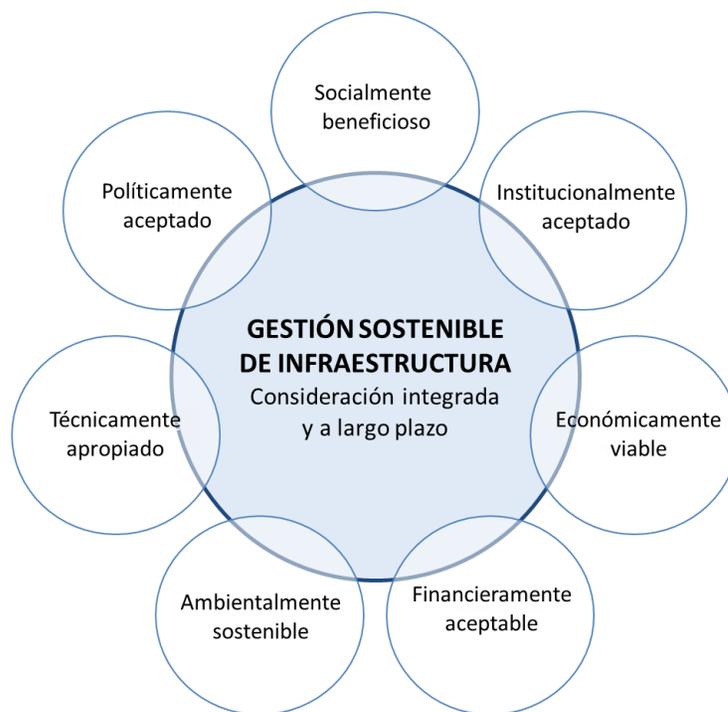
1.1.4 La evaluación de alternativas de conservación para una gestión sostenible de infraestructura

Los criterios tradicionalmente considerados en la evaluación de alternativas de conservación han sido los técnicos y económicos. La evaluación de inversiones en infraestructura mediante un análisis económico permite que las administraciones gestionen mejor sus recursos, maximizando así los beneficios sociales y permitiendo una mayor transparencia y rendimiento de cuentas (FHWA 2003).

Sin embargo, si tenemos en cuenta la definición propuesta en el Informe Brundtland de desarrollo sostenible, definido como aquel “*que satisface las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades*” (WCED 1987), parece que la consideración exclusiva de criterios técnicos y económicos resulta insuficiente para una gestión sostenible de infraestructura. De hecho, las Naciones Unidas considera que una gestión sostenible requiere la consideración integrada y conjunta de criterios económicos, ambientales y sociales (UN 2005). Estos son los denominados “pilares de la sostenibilidad”.

En el caso de infraestructura vial, el concepto de gestión sostenible se ha ampliado a la consideración integrada y conjunta de los siete aspectos recogidos en la Figura 1-6. La gestión sostenible de infraestructura requiere, por tanto, la consideración integrada y conjunta de aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales, financieros, políticos e institucionales a lo largo de su ciclo de vida (SADC 2003; Chamorro y Tighe 2009; Chamorro 2012).

El problema detectado en la actualidad es que sólo se consideran algunos de estos aspectos (tradicionalmente, los técnicos y económicos). Ante esta limitación, en los últimos años se han realizado esfuerzos para complementar estas evaluaciones con otros criterios. Tal es el caso de indicadores como el RAI “*Rural Access Index*” (Roberts et al. 2006) o el SPI “*Sustainable Priority Indicator*” (Chamorro 2012) que permiten la consideración de aspectos sociales, además de los técnicos y económicos en la gestión de carreteras de bajo tránsito.



FUENTE: Adaptado de SADC (2003)

Figura 1-6: Aspectos a considerar en la gestión sostenible de infraestructura

En otros casos, los esfuerzos se han centrado en la cuantificación del impacto ambiental. Tal es el caso del sistema de gestión HDM-4 (*Highway Development Manual*) y el modelo PaLATE (*Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*), que incorporan análisis ambientales en la

evaluación de alternativas de conservación de pavimentos (Bennett y Greenwood 2004; Nathman et al. 2009). En ambos casos, sin embargo, las evaluaciones económica y ambiental se realizan de forma independiente, careciendo de un indicador global que las considere de forma integrada.

Esta realidad contrasta con el elevado impacto ambiental derivado de las tareas de conservación. Tradicionalmente, la evaluación ambiental de infraestructura vial ha hecho énfasis en la reducción del impacto generado por la circulación de vehículos. Sin embargo, dado que cada año se invierten, a nivel mundial, más de 400 mil millones de dólares en la construcción y conservación de pavimentos (IRF 2010), parece oportuno creer que una adecuada gestión de estas operaciones puede reducir significativamente el impacto ambiental de las mismas (Santero et al., 2011). De hecho, estudios recientes han demostrado que la consideración de los impactos ambientales generados en las fases de construcción, uso y conservación de carreteras supondría un incremento del 10% del impacto generado por la operación de los vehículos (Chester y Horvath 2009). Ante esta realidad, parece conveniente que la evaluación ambiental forme parte de la evaluación de alternativas de conservación en la gestión de infraestructura vial.

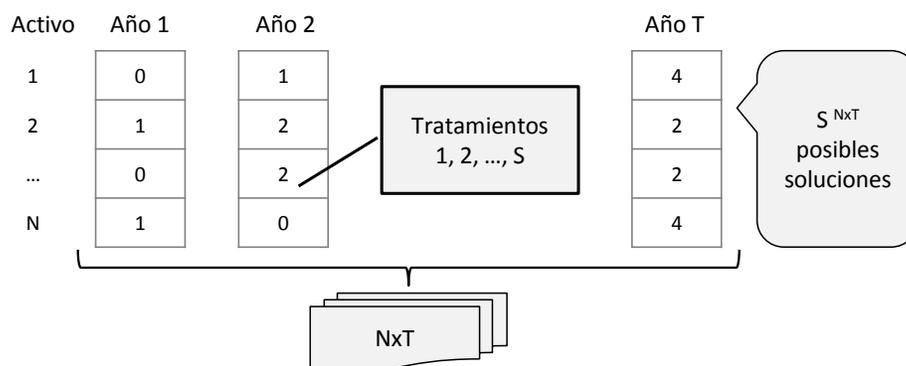
La consideración integrada de los siete aspectos en el ciclo de vida de la infraestructura resulta ciertamente desafiante. Por una parte, los aspectos a evaluar son de muy distinta naturaleza. Pero además, la importancia relativa de estos criterios varía según el ámbito en el que se realiza la evaluación. Así, por ejemplo, el aspecto social puede resultar especialmente importante en un ámbito en el que sea necesario

mejorar la accesibilidad; mientras que en una región con alto valor medioambiental, puede resultar más prioritaria la evaluación ambiental. Ante la complejidad de considerar de forma integrada los siete aspectos identificados para una gestión sostenible (Figura 1-6), experiencias previas han demostrado las ventajas de incorporar, al menos, algunos de estos aspectos a los técnicos y económicos tradicionalmente considerados (Chamorro y Tighe 2009).

A la vista de los antecedentes, el presente trabajo de investigación se centra en la consideración integrada de aspectos técnicos, económicos y ambientales en la evaluación de alternativas de conservación de infraestructura vial. Se propone así incorporar un enfoque más sostenible en la gestión actual de infraestructura, que no considera habitualmente el aspecto ambiental, o en el caso de hacerlo, carece de un enfoque integrado respecto a los aspectos técnicos y económicos.

1.1.5 El problema de optimización en la gestión de activos

Una vez evaluadas las alternativas de conservación, el proceso de optimización tiene como objetivo obtener el mayor beneficio de cada unidad monetaria empleada a lo largo de un periodo de tiempo (Haas et al. 1994; Gutiérrez-Bolivar y Achútegui 2003; TAC 2013). Sin embargo, la asignación óptima de recursos de conservación en una red de activos es un problema que no tiene una solución directa. De hecho, existen S^{TxN} factibles para una red compuesta por N activos, S posibles tratamientos de conservación y un periodo de análisis de T años (Figura 1-7) (Chan et al. 1994; Golroo y Tighe 2012).



FUENTE: Adaptado de Golroo y Tighe (2012)

Figura 1-7: Soluciones al problema de asignación de recursos

Puesto que el número de soluciones factibles al problema de optimización crece exponencialmente con el número de alternativas consideradas, se puede concluir que la asignación de recursos de conservación en una red de activos es un problema de explosión combinatoria condicionada. Los métodos de optimización mayoritariamente empleados en los SGIs para resolver este problema son los de programación matemática y los métodos de optimización aproximada, también llamados heurísticos (Tabla 1-1).

Tabla 1-1: Métodos de optimización mayoritariamente empleados en los SGIs

	Método	Características
Programación matemática	Programación lineal o no lineal	Proporcionan la solución óptima global del problema. Requieren altos tiempos de computación, por lo que su aplicación suele reducirse a pequeñas redes.
	Programación entera	
	Programación dinámica	
Optimización aproximada o heurísticos	Algoritmos evolutivos	Ofrecen soluciones cercanas a las óptimas con menores esfuerzos de computación que los métodos de optimización matemática
	Heurísticas basadas en búsquedas secuenciales por entornos	

FUENTE: Elaboración propia

Los algoritmos evolutivos y, concretamente, los algoritmos genéticos, han sido ampliamente utilizados para resolver el problema de asignación de recursos en grandes redes de activos (Chootinan et al. 2006; Meneses y Ferreira 2013). Por el contrario, las aplicaciones de métodos heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entornos resultan escasas y se limitan a resolver el problema de optimización a nivel de proyecto (Tsunokawa et al. 2006; Chou y Le 2011).

Estudios realizados en otros campos de investigación, como el diseño estructural, el diseño de rutas de transporte o la programación de proyectos, entre otros, han demostrado la eficiencia de los métodos heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entornos para resolver problemas de optimización combinatoria (Yepes y Medina 2006; Martí et al. 2013b; Torres-Machí et al. 2013). De hecho, estos métodos han proporcionado resultados más robustos que los obtenidos con algoritmos genéticos (Martínez et al. 2010; Rao y Shyju 2010; Anagnostopoulos y Koulinas 2012; Yin y Wang 2012; Pedrola et al. 2013; Mestria et al. 2013) que, en cambio, han sido más utilizados en la gestión de infraestructura vial.

1.1.6 La optimización multiobjetivo para la gestión de infraestructura

Adicionalmente al método de optimización empleado, es importante destacar la naturaleza multiobjetivo del problema. Esto es así porque la gestión sostenible requiere la consideración de diversos objetivos (técnicos, económicos, ambientales, sociales, financieros, políticos e institucionales) que, habitualmente están en

conflicto: la mejora de uno de ellos implica obtener peores resultados en, al menos, uno de los objetivos restantes (Fwa y Farhan 2012; Wu et al. 2012).

Sin embargo, las aplicaciones desarrolladas para optimizar el programa de conservación de pavimentos y puentes (Tsunokawa et al. 2006; Frangopol 2011), los dos principales activos de infraestructura vial, se centran mayoritariamente en la optimización de un único objetivo, obviando así la naturaleza compleja y multiobjetivo del problema real.

1.2 Punto de Partida de la Investigación

De los antecedentes presentados se derivan las siguientes limitaciones en la gestión actual de activos de infraestructura:

- Los criterios habitualmente considerados en la evaluación de alternativas de conservación son los técnicos y económicos. Si bien recientemente se han realizado esfuerzos para cuantificar el impacto ambiental derivado de la aplicación de tratamientos de conservación, los modelos actuales carecen de una evaluación integrada que considere los aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura.
- A la hora de optimizar la asignación de recursos de conservación, los métodos de optimización heurística basados en búsquedas secuenciales por entornos han sido escasamente utilizados, limitándose a resolver el problema a nivel de proyecto.
- Las aplicaciones desarrolladas para optimizar el programa de conservación de infraestructura vial se centran mayoritariamente en la optimización de un

único objetivo, obviando así la naturaleza compleja y multiobjetivo del problema real.

Ante estas limitaciones, surge la oportunidad de desarrollar un indicador para la evaluación de alternativas de conservación de infraestructura vial que considere de forma integrada aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura. Así mismo se detecta la oportunidad de desarrollar una herramienta de optimización heurística multiobjetivo que, considerando una evaluación sostenible, mejore la asignación de recursos de conservación en infraestructura vial.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una herramienta para la evaluación de alternativas de conservación y la optimización heurística multiobjetivo que permita una asignación más sostenible y eficiente de los recursos disponibles para la conservación de activos de infraestructura de transporte terrestre. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la idoneidad de los algoritmos de optimización heurística para optimizar la asignación de recursos de conservación a nivel de red.
- Mejorar la gestión actual de infraestructura mediante el desarrollo, programación y validación de un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo que integre los aspectos técnicos, económicos y ambientales en la evaluación de alternativas de conservación.

- Mejorar la planificación temporal de los recursos de conservación mediante el desarrollo, programación y validación de un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo.

Para alcanzar estos objetivos, se llevaron a cabo las siguientes actividades intermedias:

- Seleccionar los indicadores técnicos, económicos y ambientales para la evaluación de alternativas de conservación.
- Seleccionar, para distintos escenarios, el método de optimización más adecuado para abordar el problema de asignación de recursos de conservación.
- Definir el problema de optimización multiobjetivo existente en la asignación sostenible de recursos de conservación.
- Definir y desarrollar una herramienta computacional que integre la evaluación sostenible y la optimización heurística multiobjetivo para la asignación de recursos de conservación.
- Programar y aplicar algoritmos heurísticos para optimizar la asignación de recursos de conservación a nivel de red.
- Desarrollar, programar y validar un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo que evalúe las alternativas de conservación con un enfoque sostenible.

1.4 Hipótesis

- La asignación de recursos de conservación mediante un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo resulta en una gestión más sostenible y computacionalmente eficiente que la obtenida mediante los algoritmos heurísticos basados en búsquedas locales.

- La asignación de recursos con la herramienta de optimización propuesta mejora en términos técnicos, económicos y ambientales la gestión actual de conservación.
- La herramienta propuesta permite una mejor planificación de los recursos disponibles para la conservación evaluando los efectos técnicos y ambientales, de distintos escenarios presupuestarios.

A modo de resumen, en la Figura 1-8 se relacionan las limitaciones o lagunas identificadas en la toma de decisión para la gestión de activos y los objetivos específicos e hipótesis planteadas en la investigación.

LIMITACIONES O LAGUNAS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS
Evaluación de alternativas: no integra los aspectos técnicos, económicos y ambientales en ciclo de vida infraestructura	Analizar idoneidad de algoritmos heurísticos para optimizar la asignación de recursos a nivel de red	La asignación de recursos con algoritmo híbrido permite una gestión más sostenible y computacionalmente eficiente que los algoritmos heurísticos simples
Optimización heurística: sólo utilizada para resolver problema a nivel de proyecto	Mejorar la gestión con un algoritmo híbrido de optimización que evalúa alternativas con un indicador de evaluación sostenible	La asignación de recursos con la herramienta propuesta permite mejorar en términos técnicos, económicos y ambientales la gestión actual de conservación
Aplicaciones centradas en la optimización de un único objetivo: obvian la naturaleza compleja y multiobjetivo del problema real	Mejorar la planificación temporal de los recursos de conservación mediante algoritmo de optimización	La herramienta propuesta permite una mejor planificación temporal de los recursos disponibles para la conservación

FUENTE: Elaboración propia

Figura 1-8: Limitaciones identificadas en la toma de decisión para la gestión de activos y relación con los objetivos e hipótesis de la investigación

1.5 Alcance

La herramienta propuesta en este estudio busca asistir a los gestores de infraestructura para una asignación más sostenible de los recursos disponibles para su

conservación. Para ello, la herramienta evalúa las alternativas de conservación considerando, de forma integrada, aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura. En base a esta evaluación, la herramienta busca la asignación óptima de los recursos disponibles para conservar una red de activos.

La herramienta presentada en este trabajo de investigación se define de forma genérica, permitiendo la evaluación y optimización de recursos de conservación de infraestructura vial. La aplicación de esta herramienta a un caso concreto requiere de una serie de ajustes y calibraciones. En este trabajo de investigación, la herramienta se aplica a un caso de estudio real consistente en la gestión de una red de pavimentos urbanos en Chile.

La herramienta propuesta busca la asignación óptima de los recursos disponibles para la conservación de redes de infraestructura. En este análisis se consideran distintas alternativas de conservación que pueden ser aplicadas a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura considerando, así, distintos niveles de deterioro en la misma. Sin embargo, la herramienta propuesta no contempla la etapa de diseño de estas infraestructuras.

Esta investigación considera un enfoque determinista. Este enfoque, a diferencia del probabilista, no recoge la variabilidad de los datos considerados en el problema.

A la hora de evaluar las alternativas de conservación, la herramienta propuesta considera, de forma integrada, aspectos técnicos, económicos y ambientales. Si bien la gestión sostenible de activos requiere la consideración integrada de siete aspectos

(técnicos, económicos, ambientales, financieros, sociales, políticos e institucionales) en el ciclo de vida de la infraestructura, el alcance de este estudio se limita a la integración de los aspectos técnicos, económicos y ambientales.

La evaluación económica propuesta en esta investigación consiste, por una parte, en la comparación del coste de conservación con el presupuesto disponible. Por otra, se considera una evaluación indirecta de los beneficios a usuarios a través de un indicador de efectividad.

La evaluación ambiental, por su parte, cuantifica las emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de los tratamientos de conservación. La metodología propuesta en la herramienta de optimización permitiría considerar, de forma análoga, otros indicadores ambientales, si bien el CO₂ ha sido seleccionado por ser la principal fuente de gases de efecto invernadero (IPCC 2007).

En este sentido, es importante señalar que existen otras metodologías para incorporar el impacto ambiental en la evaluación de alternativas de conservación. Uno de los enfoques más habituales es incorporar el impacto ambiental en la evaluación económica como un coste ambiental expresado en términos monetarios. Este enfoque, sin embargo, no es aplicable a este trabajo de investigación, ya que en este caso, el objetivo es definir la mejor asignación del presupuesto disponible. Por lo tanto, la consideración del impacto ambiental en la evaluación económica, no permitiría comparar los costes reales de conservación con el presupuesto disponible.

Una vez evaluadas las alternativas de conservación, la herramienta tiene como objetivo buscar una asignación óptima de los recursos disponibles para la conservación de la red. Esta asignación debe garantizar que se cumplan unas restricciones presupuestarias (que garanticen que el coste del programa no supere el presupuesto disponible) y técnicas (de manera que la condición de todos los activos de la red sea superior a unos umbrales definidos a nivel estratégico). Queda, por tanto, fuera del alcance de esta investigación, la evaluación de necesidades y la optimización del presupuesto disponible para conservar la red en función del nivel mínimo de servicio exigido.

El método de optimización propuesto aborda el problema de asignación de recursos de conservación bajo un enfoque holístico. En oposición al enfoque secuencial, que aborda el problema en dos fases (definiendo primero los tratamientos y tiempos óptimos de conservación para cada activo y seleccionando luego los activos a tratar); el enfoque holístico supone la optimización del problema a nivel de red, ya que evalúa los posibles programas de conservación sin definir previamente ninguna solución de tratamiento, tiempo de aplicación o activo a tratar.

En esta investigación se explora la aplicación de distintos algoritmos heurísticos basados en búsquedas locales a la resolución del problema de asignación de recursos de conservación a nivel de red. Concretamente, los algoritmos heurísticos explorados son el Gradiente (GFB), la aceptación por umbrales (TA), el recocido simulado (SA) y el GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*).

1.6 Método de Investigación

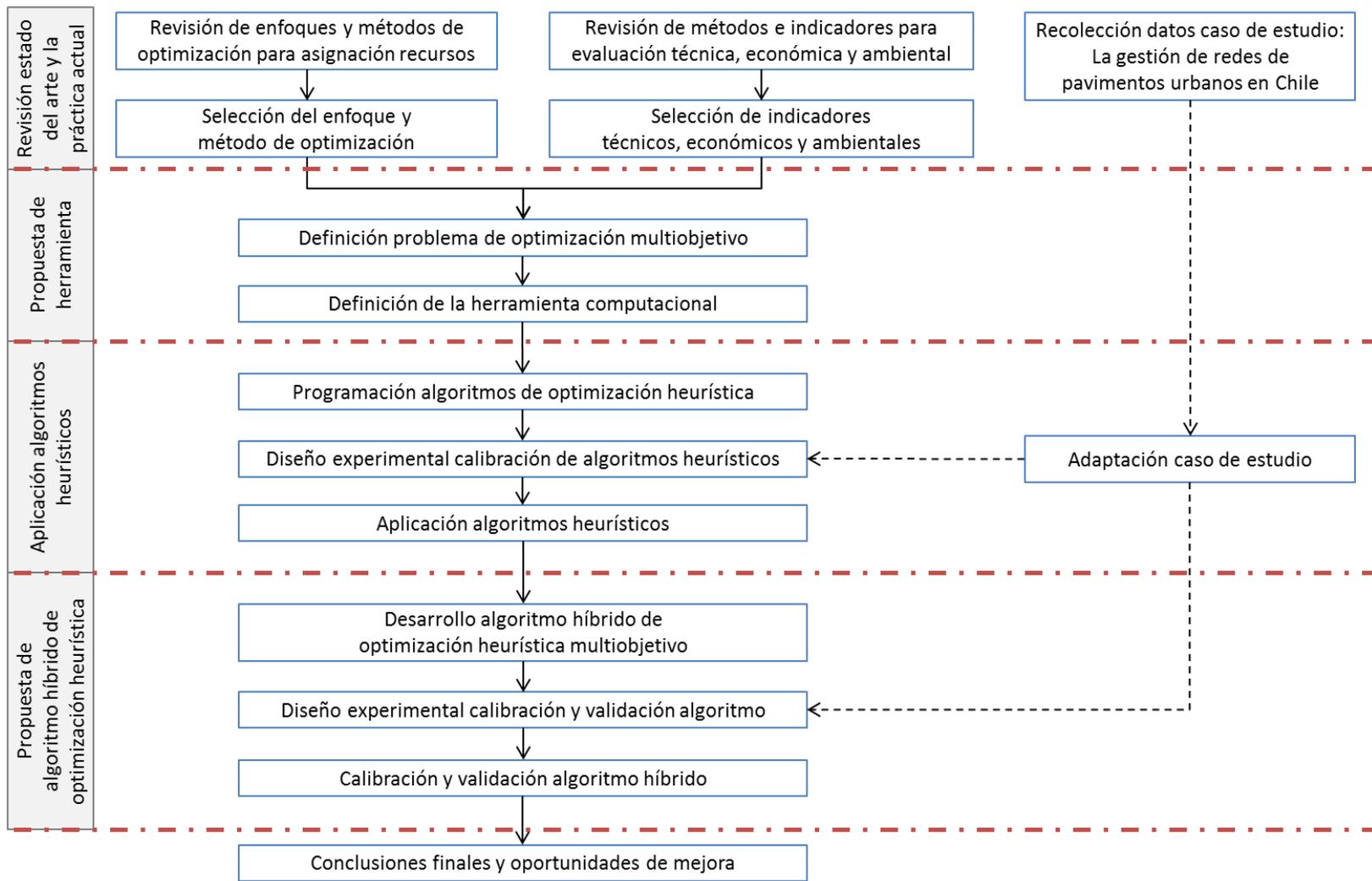
Para alcanzar los objetivos definidos anteriormente, la investigación se desarrolló en base al método de investigación descrito a continuación (Figura 1-9):

- Revisión del estado del arte y la práctica actual: En esta fase se definió el estado del arte y la práctica actual relativos a la evaluación sostenible de alternativas y a la optimización para la asignación de recursos de conservación. Así mismo se recolectaron datos relativos al caso de estudio para la aplicación futura de la herramienta. Las actividades consideradas en esta fase fueron:
 - Revisión de métodos e indicadores para la evaluación técnica, económica y ambiental de alternativas de conservación.
 - Selección de los indicadores técnicos, económicos y ambientales para la evaluación alternativas de conservación.
 - Revisión de los enfoques y métodos de optimización existentes para abordar el problema de asignación de recursos de conservación mediante un análisis de aplicaciones existentes.
 - Selección, para distintos escenarios, del enfoque y método de optimización más adecuados para resolver el problema de asignación de recursos de conservación.
 - Recolección de datos del caso de estudio consistente en la gestión de redes de pavimentos urbanos en Chile. En esta fase se revisaron manuales tanto chilenos como internacionales relativos a la conservación de pavimentos. También se realizaron entrevistas a personal técnico de las administraciones y empresas encargadas de la conservación de pavimentos en Chile. Las actividades relativas al caso de estudio chileno se enmarcan en un proyecto desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile denominado Fondef D09I1018 “Investigación y

Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile” (Videla et al. 2010).

- Propuesta de herramienta: En base a las limitaciones y oportunidades de mejora identificadas en la revisión del estado del arte y la práctica, en esta fase se propuso una herramienta de optimización heurística multiobjetivo para la asignación de recursos de conservación. Esta propuesta consideró:
 - Definición del problema de optimización multiobjetivo existente en la asignación sostenible de recursos de conservación. Como resultado de esta actividad quedan definidas las variables, parámetros, funciones objetivo y restricciones del problema de optimización.
 - Definición del marco conceptual de la herramienta computacional.
- Aplicación de algoritmos de optimización heurística: En esta fase se analizaron y aplicaron los algoritmos heurísticos para resolver el problema de asignación de recursos. Las actividades desarrolladas en esta fase fueron:
 - Programación de los algoritmos heurísticos para optimizar la asignación de recursos de conservación.
 - Diseño experimental para la calibración de los algoritmos heurísticos. Este diseño experimental se basa en la información recolectada para el análisis del caso de estudio chileno.
 - Aplicación y calibración de los algoritmos heurísticos al caso de estudio.
- Propuesta de un algoritmo híbrido de optimización heurística: En esta fase se propuso y validó un nuevo algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo. Esta fase consideró las siguientes actividades:
 - Desarrollo de un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo que evalúa las alternativas de conservación considerando, de forma integrada, aspectos técnicos y ambientales en la evaluación de alternativas.

- Diseño experimental para la calibración del algoritmo heurístico propuesto considerando el caso de estudio chileno.
- Calibración del algoritmo híbrido propuesto al caso de estudio.
- Diseño experimental para la validación del algoritmo híbrido propuesto. Este diseño experimental analiza distintos escenarios basados en la información recolectada para el análisis del caso de estudio chileno.
- Aplicación y validación del algoritmo híbrido propuesto. En esta fase se valida el algoritmo propuesto a partir de la comparación de la eficiencia en términos computacionales y técnicos, económicos y ambientales de los programas de conservación obtenidos con el algoritmo híbrido propuesto y las heurísticas basadas en búsquedas locales. En esta validación se consideran distintos escenarios extraídos de un caso de estudio real consistente en la gestión de una red de pavimentos urbanos en Chile.
- Conclusiones finales y oportunidades de mejora: De la aplicación de la herramienta propuesta se derivan conclusiones para la mejora de la gestión de redes de activos de infraestructura. Finalmente se definen las limitaciones de la herramienta propuesta y se identifican oportunidades de mejora que definen posibles líneas futuras de investigación.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 1-9: Método de investigación

1.7 Organización de la Tesis

En este capítulo de introducción se presentan los fundamentos de la investigación objeto de esta tesis doctoral.

En el capítulo 2 se presenta el estado actual del arte y la práctica actual en la toma de decisión para la gestión de activos de infraestructura de transporte terrestre. Como resultado de este análisis, se identifican las limitaciones y oportunidades para mejorar la gestión sostenible de estos activos.

En el capítulo 3 se presenta la herramienta de optimización propuesta para aplicar los algoritmos de optimización heurística a la gestión de activos de infraestructura de transporte terrestre.

En el capítulo 4 se aplican los algoritmos heurísticos para optimizar la asignación de recursos de conservación. Esta aplicación considera un caso de estudio real de gestión de redes de pavimentos urbanos en Chile.

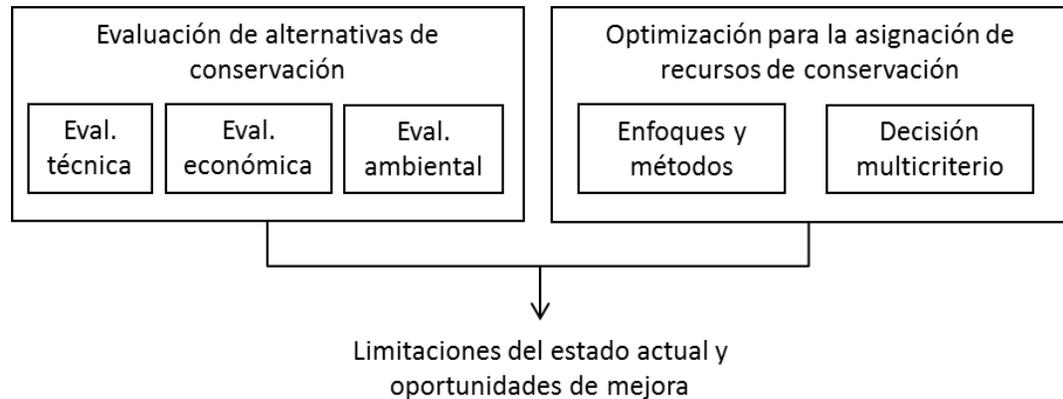
En el capítulo 5 se propone y valida un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo que evalúa las alternativas de conservación considerando, de forma integrada, aspectos técnicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación derivadas de este trabajo de investigación.

Finalmente, en el capítulo 7 se presenta un resumen extendido de la tesis doctoral en inglés, siendo este uno de los requisitos exigidos para optar a la mención internacional del título de doctor, según el RD 99/2011 por el que se regulan las enseñanzas de doctorado en España.

2 LA TOMA DE DECISIÓN EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS

En este capítulo se revisan los métodos para la evaluación de alternativas de conservación y la asignación óptima de recursos. Puesto que los métodos empleados en ambos casos son de distinta naturaleza, la revisión del estado del arte se estructura en dos secciones: una en la que se revisan los métodos de evaluación de alternativas de conservación, y otra en la que se aborda el problema de optimización para la asignación de recursos (Figura 2-1).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 2-1: Aspectos abordados en la revisión del estado del arte

En cada una de estas secciones se analiza el estado del arte y la práctica existente en los sistemas de gestión actuales y se identifican las limitaciones del estado actual. Estas limitaciones se integran en la última sección del capítulo definiendo así las oportunidades de mejora identificadas en este trabajo de investigación.

2.1 Evaluación de Alternativas de Conservación

El componente de evaluación de alternativas analiza los efectos, presentes y futuros, derivados de la aplicación de distintas alternativas de conservación en los activos que componen la red. De acuerdo al alcance de este estudio, la revisión de los métodos de evaluación se centra en los aspectos técnicos, económicos y ambientales.

2.1.1 Evaluación técnica

El fin último de la infraestructura es cumplir los objetivos para los cuales fue diseñada (Uddin et al. 2013). Para ello, la infraestructura debe satisfacer, tanto las exigencias funcionales demandadas por los usuarios; como los requerimientos estructurales derivados de las solicitudes a las cuales está sometida. En otras palabras, el objetivo principal de la infraestructura es servir de forma cómoda, segura y eficiente al tránsito. Para lograr dicho cometido, la infraestructura debe cumplir tres funciones básicas (de Solminihac 2001):

- Poseer capacidad estructural suficiente como para soportar las solicitudes a las cuales estará sometida.
- Tener un adecuado nivel de servicio, definido a partir de la percepción que tienen los usuarios.
- Garantizar al usuario una condición de servicio segura bajo todas las condiciones.

Puesto que la condición de la infraestructura varía a lo largo del tiempo debido a las solicitudes directas (ej. tránsito) e indirectas (ej. clima) a las que está sometida así

como a las acciones de conservación realizadas; es necesario evaluar periódicamente su estado para poder determinar el cumplimiento de sus tres funciones básicas.

En el área de gestión de infraestructura vial, este proceso es conocido como evaluación técnica y consta de tres fases: (1) recolección de datos en terreno, (2) evaluación de la infraestructura a través de un índice de condición y (3) predicción de la condición futura mediante modelos de comportamiento.

a) Recolección de datos en terreno

La información necesaria para llevar a cabo la evaluación técnica proviene de la auscultación de la infraestructura. Esta auscultación puede ser funcional o estructural, dependiendo de las características de la infraestructura que se deseen evaluar. Puesto que la información a recopilar en la auscultación dependerá del tipo de infraestructura vial a evaluar, se proponen una serie de trabajos y guías desarrolladas por distintas administraciones para la auscultación de pavimentos y puentes (Chamorro 2004; AASHTO 2006; MOP 2010; Ministerio de Fomento 2012).

Teniendo en cuenta que la herramienta propuesta en este trabajo se aplica a un caso de estudio consistente en la gestión de redes de pavimentos urbanos, se describe a continuación, de forma sucinta, la información recogida en la auscultación funcional y estructural de pavimentos.

En el proceso de auscultación, las características de la infraestructura se cuantifican y miden en función de ciertos índices o indicadores. Existen distintos indicadores que evalúan una misma característica de la infraestructura, existiendo en algunos casos, ecuaciones que correlacionan indicadores para poder comparar los valores obtenidos bajo distintas metodologías de medición (Chamorro 2004).

En la auscultación de pavimentos, las principales características evaluadas son: textura, resistencia al deslizamiento, regularidad superficial, deterioro superficial y propiedades mecánicas de la estructura (Chamorro 2004). A modo de ejemplo, la Tabla 2-1 (adaptada por Chamorro (2004) a partir de Crespo del Río (1991)) presenta los principales indicadores utilizados para evaluar distintas características del pavimento; las cuales están clasificadas según la función del pavimento que se está evaluando (nivel de servicio, seguridad o capacidad de soporte). A la vista de esta clasificación se puede apreciar que existe más de un indicador o índice para evaluar una característica del pavimento (Crespo del Río 1991).

Tabla 2-1: Características evaluadas en la auscultación de pavimentos

Tipo de Auscultación	Función del Pavimento	Característica Medida	Indicadores Evaluados
Auscultación Funcional	Nivel de servicio	Regularidad superficial	IRI PSI PSR
	Seguridad	Textura	Macrotextura Microtextura
Resistencia al deslizamiento			Coefficiente de fricción IFI
Auscultación Estructural	Capacidad de Soporte	Propiedades mecánicas	Deflexiones y deformaciones
		Deterioro superficial	Agrietamiento Defectos superficiales Deformación del pavimento

FUENTE: Chamorro (2004) a partir del esquema de Crespo del Río (1991)

i) Auscultación funcional de pavimentos

La auscultación funcional provee la información necesaria para determinar que el pavimento cumpla con la condición de servicio y seguridad requerida por los usuarios de la vía.

Nivel de servicio:

El nivel de servicio evalúa la capacidad del pavimento para servir al tránsito ofreciendo un nivel de calidad adecuado a los usuarios (Haas et al. 1994). El

nivel de servicio es, por tanto una percepción subjetiva que, basada en la percepción de los usuarios, evalúa la comodidad o confort que experimenta el usuario de la vía al transitar por ella.

Los indicadores habitualmente utilizados para medir el nivel de servicio son el PSR (*Present Serviceability Rating*), evaluado de forma subjetiva a partir de la percepción de los usuarios; o el PSI (*Present Serviceability Rating*), basado en una medición objetiva que considera la regularidad y el deterioro superficial (Carey y Irick 1960; HRB 1962). Actualmente el principal indicador utilizado es el IRI (Índice de Regularidad Internacional), el cual se evalúa a partir del perfil longitudinal del pavimento (Sayers et al. 1986).

Seguridad:

Si bien existen múltiples factores que afectan a la seguridad en la conducción (diseño geométrico, señalización, características del vehículo, etc.), la resistencia al deslizamiento es el factor relacionado con el pavimento, que resulta más determinante (Haas et al. 1994). La resistencia al deslizamiento se puede definir como la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y los neumáticos, que estando impedidos para rotar, deslizan a lo largo de la superficie (Gaete et al. 1988). Esta resistencia al deslizamiento está determinada por el coeficiente de fricción, que depende de la textura de la superficie del pavimento, características de los neumáticos y condiciones de operación del vehículo (de Solminihac 2001).

De estos tres grupos de factores, la textura del pavimento es el único dependiente del estado de conservación de la carretera. Al analizar su incidencia en la seguridad, cabe distinguir entre la microtextura y la macrotextura del pavimento. La primera influye en la resistencia al deslizamiento de vehículos que transitan a baja velocidad sobre superficies mojadas; mientras que la macrotextura facilita el drenaje rápido del agua, ofreciendo resistencia al deslizamiento de vehículos que se desplazan a altas velocidades sobre pavimentos mojados.

En la década de los noventa, se creó un índice para describir la fricción y textura del pavimento denominado Índice de Fricción Internacional (IFI). Este índice viene expresado por dos números, uno adimensional que representa la fricción (cero indica deslizamiento perfecto y uno adherencia) y otro en unidades de velocidad (km/h) que representa la macrotextura. Este par de valores expresan el IFI de un pavimento y permiten calcular el valor de fricción a cualquier velocidad de deslizamiento (de Solminihac 2001).

i) Auscultación estructural de pavimentos

A partir de las propiedades mecánicas de la estructura y de los deterioros superficiales del pavimento, la auscultación estructural permite determinar la condición y capacidad estructural del pavimento.

Propiedades mecánicas:

Mediante la evaluación de las propiedades mecánicas del pavimento es posible definir parámetros de resistencia de las diversas capas que conforman la estructura, tales como módulo elástico, propiedades de fatiga, propiedades de deformación y tensiones residuales.

La principal metodología utilizada para determinar la capacidad estructural del pavimento es la medición de deflexiones, correspondientes a la deformación elástica que experimenta un pavimento producto del paso de una carga. Como complemento del tipo de ensayos realizados para determinar las propiedades mecánicas del pavimento, se recomienda consultar los trabajos de González et al. (2011), Halles et al. (2013) y Sanchez-Alonso (2013).

Deterioro superficial:

El deterioro superficial de un pavimento se manifiesta a través de grietas, defectos superficiales y deformaciones del pavimento; así como de los

defectos de tratamientos y reparaciones realizadas al mismo. La evaluación del deterioro superficial del pavimento se realiza mediante la inspección visual de pavimentos, la cual puede ser manual o automática dependiendo de la metodología utilizada para la recolección de la información. Para un mayor detalle del proceso, pueden consultarse trabajos y guías propuestas por distintas administraciones para la auscultación de deterioros superficiales de pavimentos (Miller y Bellinger 2003; Chamorro et al. 2009; Osorio et al. 2012a).

b) Índices compuestos de condición

Como resultado del proceso de auscultación, se cuantifican los indicadores que evalúan determinadas características de la infraestructura (ej. regularidad superficial, textura, etc.). Estos indicadores son los habitualmente utilizados en la gestión a nivel de proyecto, en la que se trabaja con información detallada para la toma de decisiones técnicas (Figura 1-4).

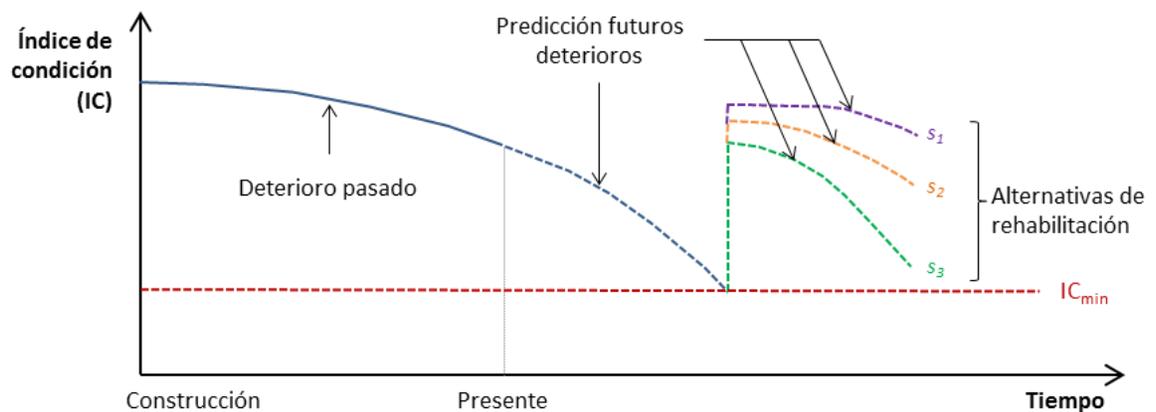
Sin embargo, ante la variedad de indicadores y con el objetivo de contar con una herramienta de comunicación eficaz, surge la utilización de índices compuestos de condición. Estos índices, obtenidos como combinación de indicadores que reflejan una medición particular de deterioro, suelen ser los empleados en la gestión a nivel de red o estratégica (propia del problema de asignación de recursos de conservación considerado en esta investigación) (Haas et al. 1994; de Solminihaç 2001).

Estudios previos han abordado el desarrollo de indicadores de condición para la gestión de pavimentos (Chamorro y Tighe 2009; Chamorro et al. 2009, 2010; Osorio et al. 2014a) y puentes (Neves y Frangopol 2005; Valenzuela et al. 2010); así como la aplicación de los mismos en casos de estudio reales (Molenaar y Navarro 2011). En el caso de pavimentos, por ejemplo, algunos de los índices compuestos más utilizados son el PCI (*Pavement Condition Index*) (Shahin 2005), el PQI (*Pavement Quality Index*) (Karan et al. 1983) y el POI (*Pavement Overall Index*) (Baladi et al. 1992). Puesto que estos índices son una combinación de distintos deterioros, su

aplicación a una red de infraestructura específica requiere de una calibración previa (de Solminihac 2001; de Solminihac et al. 2009).

c) Modelos de comportamiento

Los modelos de comportamiento son expresiones matemáticas que permiten predecir el estado de la infraestructura en el tiempo así como pronosticar los efectos, a corto y largo plazo, de las operaciones de conservación efectuadas sobre ella. La representación gráfica de estos modelos recibe el nombre de curvas de comportamiento (Figura 2-2).



FUENTE: Adaptado de Haas et al. (1994)

Figura 2-2: Curva de comportamiento de una infraestructura

El objetivo de estos modelos es realizar estimaciones razonables de los efectos de distintas actuaciones de mantenimiento, el nivel de deterioro resultante de las mismas y su progresión en el tiempo. Estos modelos habitualmente consideran que la aplicación de un tratamiento de conservación produce uno o varios de los siguientes efectos (Neves y Frangopol 2005): (1) aumento puntual (salto) del índice de condición en el momento inmediatamente posterior a la aplicación del tratamiento; (2) paralización del deterioro durante un intervalo de tiempo posterior a la aplicación del tratamiento; y (3) reducción de la velocidad del deterioro durante un intervalo de tiempo posterior a la aplicación del tratamiento.

A grandes rasgos, los modelos de comportamiento pueden clasificarse como deterministas o probabilísticos (Haas et al. 1994; Broten 1996; TAC 2013). Los métodos determinísticos muestran la evolución más común del deterioro a lo largo del tiempo; mientras que los probabilísticos permiten recoger la variabilidad observada en el deterioro. Para el desarrollo de estos modelos existen cuatro posibles enfoques, los cuales se introducen de forma breve a continuación (Haas et al. 1994; TAC 2013):

- Mecanicistas puros: basan el comportamiento en medidas de tensiones o esfuerzos a partir de las propiedades físicas y mecánicas de las capas del pavimento (Broten 1996; de Solminihac 2001). Un ejemplo de este enfoque es el diseño de pavimentos por tensiones máximas.
- Empíricos: a partir de datos de infraestructuras existentes, el deterioro se define como la variable dependiente, expresada como relación de una o más variables independientes tales como edad, tráfico, etc.
- Mecanicistas-empíricos: relaciona parámetros de respuesta asociados a propiedades mecánicas y/o físicas con el nivel de deterioro funcional y/o estructural. Un ejemplo de este enfoque es el utilizado en la guía del AASHTO para el diseño de pavimentos (AASHTO 2006).
- Probabilísticos: la evolución del deterioro se obtiene de un análisis probabilístico a partir de datos históricos u opinión de expertos. Este enfoque es útil para captar la tendencia no lineal y el comportamiento estocástico de la infraestructura. Los modelos empleados con este enfoque son modelos de Markov basados en opiniones de expertos o datos de terreno, modelos Bayesianos y redes neuronales.

Una vez introducidos los posibles enfoques existentes para el desarrollo de los modelos de comportamiento, se recoge a continuación, una breve descripción de las técnicas más empleadas para su desarrollo:

- Modelos de regresión: son modelos basados en métodos de regresión estadística en los que se recogen datos de condición a lo largo del tiempo. Estos valores se ajustan a una curva en función del tiempo o tráfico. Este método es apropiado en el caso de disponer de una gran cantidad de datos (Brotten 1996; de Solminihac 2001).
- Modelos bayesianos: Los modelos bayesianos combinan datos de deterioro con información tomada de expertos. Una de las ventajas de esta técnica es que la opinión de los expertos supone una ratificación de los modelos de deterioro basados únicamente en datos, así como un mayor rango de aplicación y fiabilidad (Hajek y Bradbury 1996).
- Modelos de Markov: Se fundamentan en el principio que el estado actual de la infraestructura puede emplearse para predecir su estado futuro. En la práctica, se basa en matrices de transición que expresan la probabilidad de que una infraestructura con una condición inicial determinada, pase a tener otra condición a lo largo del tiempo. Este método requiere definir la condición de la infraestructura a partir de un conjunto de variables independientes y establecer una serie de rangos para definir su estado futuro (Haas et al. 1994). La matriz de transición se construye a través de la opinión de expertos o de mediciones en terreno. La principal ventaja de este método es que permite predecir el deterioro sin una base de datos previa, si bien presenta la limitación de que los expertos tienen una menor capacidad de predecir el deterioro en periodos de tiempo prolongados.

d) Análisis de los métodos de evaluación técnica

Puesto que tanto el indicador de condición como los modelos de comportamiento deben ser desarrollados y validados para una aplicación concreta y teniendo en cuenta que estas tareas quedan fuera del alcance de esta investigación, la selección del indicador técnico más adecuado se abordará en la aplicación a un caso de estudio.

2.1.2 Evaluación económica

La evaluación económica permite identificar, cuantificar y evaluar los costes y beneficios de distintas alternativas a lo largo de un periodo temporal. Esta evaluación facilita que las administraciones gestionen mejor sus recursos, de forma que se maximicen los beneficios sociales y exista una mayor transparencia y rendimiento de cuentas (FHWA 2003). La evaluación económica resulta clave en la gestión de infraestructura vial y, concretamente, en las etapas de evaluación de alternativas y asignación del presupuesto abordadas en este trabajo de investigación (Figura 1-5).

En la evaluación de alternativas de conservación, los distintos tratamientos que pueden aplicarse en la vida útil de la infraestructura difieren tanto en sus costes como en los efectos en la condición de la infraestructura derivados de su aplicación. Esto, unido al comportamiento no lineal con el tiempo que presenta el deterioro de la infraestructura (Figura 1-1), genera que el momento en el que aplican las acciones de conservación sea un factor clave tanto en términos técnicos como económicos. De hecho, en el caso de pavimentos, se estima que su conservación tardía aumenta entre seis y diez veces los costes de los tratamientos necesarios para mejorar su condición (Figura 1-1) (CSCE et al. 2012).

En la asignación del presupuesto, la evaluación económica es necesaria porque las administraciones a cargo de la gestión disponen de unos recursos limitados para su conservación. El programa de conservación debe, por tanto, cumplir con la restricción presupuestaria existente.

Ante la importancia de la evaluación económica en la gestión de infraestructura vial, en esta sección se analizan los tipos de análisis, indicadores y conceptos (costes y beneficios) a considerar en la evaluación económica así como los modelos existentes para la evaluación de alternativas de conservación. Como complemento de esta información, en el Anexo A se recoge información relativa a conceptos básicos de la evaluación económica.

a) Tipos de análisis económicos

Se identifican cinco tipos de análisis económicos para la evaluación de proyectos, los cuales son presentados en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Tipos de análisis económicos

Características	
Análisis del Coste del Ciclo de Vida (ACCV)	El ACCV (también conocido por sus siglas en inglés LCCA, <i>Life Cycle Cost Analysis</i>) compara alternativas en base a sus diferentes flujos de costes a lo largo del ciclo de vida (Walls y Smith 1998; Sampedro 2013). El ACCV considera exclusivamente los costes asociados a la intervención y no sus beneficios, por lo que su aplicación requiere que los beneficios (y, en consecuencia, los niveles de servicio) de las alternativas analizadas sean similares (FHWA 2003).
Análisis Coste-Beneficio (ACB)	El ACB identifica el beneficio neto generado por cada alternativa mediante la comparación de sus costes y beneficios (FHWA 2003). Una de las limitaciones de este enfoque es que los costes sociales y ambientales son evaluados de forma diferente por los actores involucrados (administración, usuarios, etc.), por lo que utilizar el ACB como único indicador dificulta la consideración de los siete aspectos propios de la gestión sostenible de infraestructuras (Parkin et al. 2003; Hayes et al. 2012).
Análisis Coste-Efectividad (ACE)	El ACE considera los costes con su valor actual y evalúa los beneficios a través de un indicador que mide la efectividad de la inversión. Permite comparar alternativas que generan respuestas no cuantificables en términos monetarios (Haas et al. 2006; Khurshid et al. 2009). Requiere, en cambio, una metodología objetiva para definir la relación beneficio-condición.

Características	
Análisis de Impacto Económico (AIE)	El AIE evalúa los efectos en la economía local, regional o nacional cuantificando, entre otros, el efecto en la actividad económica, empleo, niveles salariales, inmigración, turismo, etc. (FHWA 2003). Este análisis ofrece resultados complementarios al resto de análisis económicos.
Análisis Financiero (AF)	El AF estudia las necesidades de financiación de un proyecto a partir del desfase entre los gastos y los recursos disponibles. Si bien este análisis es esencial en la evaluación de una inversión, su objetivo es diferente de los anteriores, por lo que se desarrolla de forma paralela e independiente (FHWA 2003; Uddin et al. 2013).

FUENTE: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los objetivos y fundamentos de los tipos de análisis económicos disponibles, se identifican algunos análisis menos convenientes para la evaluación de alternativas de conservación. Así, por ejemplo, el AIE no parece idóneo porque no es previsible que las alternativas de conservación presenten diferencias sustanciales en el impacto en la economía local, regional o nacional. El AF tampoco resulta apropiado porque su objetivo es identificar las necesidades de financiación, no evaluando si un proyecto es beneficioso socialmente frente a otro. Por lo tanto, debe entenderse como un análisis complementario a realizar una vez el proyecto haya sido identificado como socialmente beneficioso (Tabla 2-3).

Tabla 2-3: Criterios de decisión en la evaluación social y financiera

		Evaluación social	
		Positiva	Negativa
Evaluación financiera	Positiva	Realizar el proyecto	Rechazar el proyecto
	Negativa	Requiere análisis de disponibilidad presupuestaria	Rechazar el proyecto

FUENTE: de Rus et al. (2006)

Los restantes tipos de análisis económico (ACCV, ACB y ACE) se diferencian fundamentalmente en dos aspectos: (1) consideración sólo de costes o de costes y beneficios; y (2) tipo de cuantificación de los beneficios, pudiendo ser en términos monetarios o mediante otro indicador (Tabla 2-4).

Tabla 2-4: Clasificación de tipos de análisis económico

Tipo de análisis	Conceptos considerados		Cuantificación de beneficios	
	Costes	Costes y beneficios	Monetaria	No monetaria
ACCV	✓			
ACB		✓	✓	
ACE		✓		✓

FUENTE: Elaboración propia

b) Indicadores de idoneidad en la evaluación económica

En función del tipo de análisis económico utilizado, existen distintos indicadores para evaluar la idoneidad de las alternativas de conservación (Tabla 2-5).

Tabla 2-5: Tipos de análisis económico e indicadores aplicables.

Indicador	Tipo de análisis económico				
	ACCV	ACB	ACE	AIE	AF
Valor Actual Neto (VAN)	✓	✓	✓	✓	✓
Coste Anual Equivalente (CAE)	✓	✓		✓	✓
Tasa Interna de Retorno (TIR)		✓			✓
Coste-beneficio (CB)		✓			
Coste-efectividad (CE)			✓		
Periodo recuperación inversión (PRI)		✓			✓

FUENTE: Elaboración propia

i) Valor Actual Neto (VAN)

El VAN, también denominado valor presente neto (VPN), actualiza los beneficios y costes a lo largo del periodo de análisis aplicando una tasa de descuento (el detalle de su formulación matemática se recoge en el Anexo B). Este indicador también puede emplearse considerando únicamente costes, en cuyo caso se denomina valor actual neto en términos de coste. Se considera que una inversión es rentable cuando el valor actual de los flujos de ingresos es mayor que el de costes, es decir, cuando el VAN es positivo.

El VAN es el indicador más extendido en la evaluación de proyectos con inversión pública (Haas et al. 1994, 2006; Hayashi y Morisugi 2000). La principal ventaja del VAN es que los costes y beneficios se expresan con un único valor. Sin embargo, presenta la limitación de considerar únicamente beneficios evaluados en términos monetarios.

ii) Coste Anual Equivalente (CAE)

El CAE combina los costes de capital iniciales y futuros y los expresa como un coste anual constante a lo largo del periodo de análisis (el detalle de su formulación matemática se recoge en el Anexo B). Este indicador presenta la ventaja de ser simple y de fácil comprensión, resultando especialmente útil para presupuestos establecidos con una base anual. Sin embargo presenta la limitación de considerar únicamente conceptos expresados en términos monetarios (Haas et al. 1994).

iii) Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR determina el valor de la tasa de descuento que iguala costes y beneficios (ver formulación matemática en Anexo B). La alternativa más rentable será aquella con mayor valor del TIR. El TIR resulta especialmente adecuado para evaluar la rentabilidad de inversiones privadas (Walls y Smith 1998). Sin embargo, al estar expresado como un porcentaje, no cuantifica las cantidades totales de inversión, por lo que suele acompañarse de otros indicadores como el VAN. A esta limitación hay que añadirle que sólo considera beneficios evaluados en términos monetarios.

iv) Coste-Beneficio (CB)

El CB representa la razón entre los beneficios y costes actuales, considerándose rentables aquellas alternativas con un valor superior a la unidad (ver formulación matemática en Anexo B). La principal ventaja del CB es que constituye uno de los métodos más extendidos en la evaluación

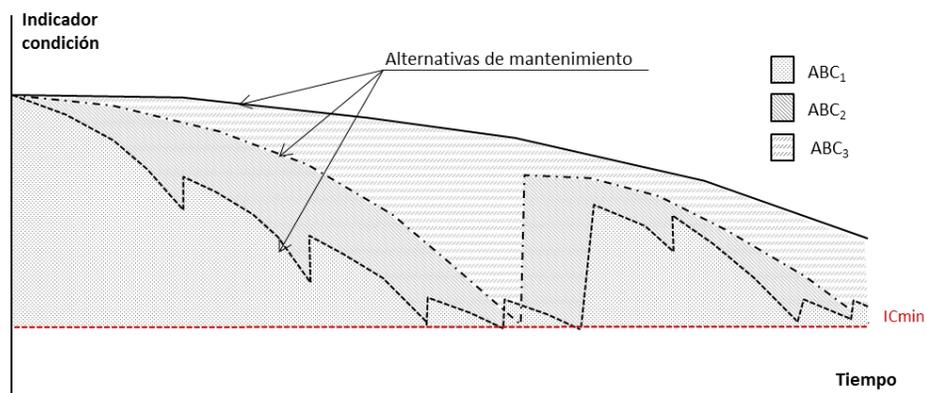
económica de proyectos públicos de infraestructuras de transporte terrestre (Haas et al. 1994; Browne y Ryan 2011). Sin embargo, de forma similar al TIR, el CB no proporciona información sobre las cantidades totales de costes ni beneficios. Además no existe un consenso sobre qué debe considerarse en el numerador o denominador del CB, como por ejemplo, si las reducciones de coste son beneficios o costes negativos (Walls y Smith 1998; Khurshid et al. 2009). A esta limitación hay que añadir que sólo considera beneficios evaluados en términos monetarios.

v) Coste-Efectividad (CE)

El CE representa la razón entre la efectividad de una alternativa y sus costes actuales (ver formulación matemática en Anexo B). La efectividad evalúa en qué medida una determinada alternativa mejora la condición de la infraestructura y retrasa el proceso de deterioro (Khurshid et al. 2009). La efectividad de una alternativa puede evaluarse a través del área comprendida entre la curva de comportamiento y el valor mínimo de nivel de servicio (ABC) (Figura 2-3), ponderando este valor por factores como el tráfico o la longitud del tramo (Ecuación (2.1)).

$$Efectividad = ABC \cdot L \cdot TMDA \quad (2.1)$$

Donde, ABC es el área entre curva de comportamiento y nivel mínimo de servicio; L es la longitud del tramo; y $TMDA$ es el tráfico medio diario anual



FUENTE: Adaptado de Haas et al. (1994)

Figura 2-3: Efectividad de un programa de conservación

El ABC es un buen indicador de la efectividad de una alternativa de conservación porque, en primer lugar, una infraestructura con una buena condición (y, por tanto, mayor ABC) genera mayores beneficios a los usuarios que una alternativa de peor condición. En segundo lugar, permite incluir en la evaluación beneficios que son difíciles de cuantificar monetariamente, ya que incluye de forma indirecta el efecto en la reducción de accidentes, tiempo de viaje y costes de operación vehicular, entre otros (Haas et al. 2006; Khurshid et al. 2009; Chamorro 2012).

vi) Periodo de devolución o recuperación de la inversión (PRI)

El PRI evalúa el año a partir del cual el conjunto de beneficios iguala y supera a los costes actualizados (Hall et al. 2003). El PRI presenta ventajas y limitaciones similares al TIR y suele utilizarse como complemento de otros indicadores (ej. VAN) en la evaluación de inversiones privadas.

c) Costes y beneficios

La principal diferencia de los indicadores presentados en la sección anterior radica en la consideración de sólo costes o costes y beneficios, así como en la forma de cuantificar los beneficios. Es por esto que la elección del indicador a implementar en un SGI requiere de un análisis de los costes y beneficios a considerar en la evaluación, los cuales pueden clasificarse en tres grupos (FHWA 2003):

i) Costes de la administración

Recoge los costes necesarios para la puesta en servicio de la infraestructura así como los asociados a las operaciones de conservación (FHWA 2003). Los costes de estas operaciones dependerán de las características específicas de cada caso. Para la estimación de estos costes, resultan de interés los estudios realizados de Cirilovic et al. (2014) y Harper et al. (2014).

ii) Efecto sobre los usuarios

Este concepto cuantifica los costes y/o beneficios en los que incurren los viajeros al circular por la infraestructura en las condiciones dadas por la alternativa estudiada. Debido a la penalización que estos costes suponen en la evaluación (sin tener incidencia real en los presupuestos) y a la incertidumbre asociada a su estimación, este concepto ha sido tradicionalmente obviado en la evaluación de proyectos de infraestructura de transporte terrestre (FHWA 2003). Sin embargo, se ha demostrado que estos costes pueden ser más importantes que los costes de la administración, existiendo una tendencia creciente a incluirlos (Delwar y Papagiannakis 2001; Labi y Sinha 2003). Los efectos sobre los usuarios se calculan como suma de tres conceptos:

- Accidentes: considera el coste derivado de accidentes, calculado en función de la probabilidad de ocurrencia y la gravedad del mismo.
- Tiempo de viaje (TV): recoge los costes asociados al valor del tiempo empleado en el desplazamiento.
- Costes de operación vehicular (COV): considera los costes asociados al consumo de combustible, desgaste de neumáticos y otras partes del vehículo.

Para finalizar es importante señalar que, en la evaluación de los efectos sobre los usuarios, se debe distinguir entre:

- Efecto a usuarios en operación normal: corresponden a los efectos sobre usuarios en periodos en los que no existen operaciones que reduzcan la capacidad de la infraestructura. Este concepto se considera en el ACB y en el ACE pero no se incluye en el ACCV porque aquí las alternativas presentan niveles de servicio similares (Tabla 2-6).

- Efecto a usuarios en zonas de trabajo: recogen los costes generados al circular por un tramo en el que se ha modificado la circulación por operaciones de construcción o conservación.

iii) Externalidades

Las externalidades cuantifican el impacto directo provocado en los no usuarios, incluyendo efectos como la contaminación del aire, ruidos, afecciones a la calidad del agua, etc. (FHWA 2003). Si bien existen estudios dirigidos a avanzar en la cuantificación de estos efectos (Browne y Ryan 2011; Cross et al. 2011), su cuantificación en términos monetarios resulta compleja (FHWA 2003; Khurshid et al. 2009). Es por esto que estos efectos se excluyen habitualmente de la evaluación económica, considerándolos en la toma de decisión a través de indicadores adicionales.

Tabla 2-6: Costes y beneficios incluidos en los tipos de análisis económicos

Costes y beneficios	ACCV	ACB	ACE
Costes de la administración	✓	✓	✓
Efecto sobre usuarios en zona de trabajos	✓	✓	✓
Efecto sobre usuarios en operación normal		✓	✓
Externalidades		✓	✓

FUENTE: Elaboración propia

A partir de este análisis, se infiere que los conceptos a incluir en la evaluación dependen del tipo de análisis (Tabla 2-6). Así, por ejemplo, el efecto sobre los usuarios en una operación normal se considera en el ACB y en el ACE pero no se incluye en ACCV porque aquí las alternativas presentan niveles de servicio similares.

d) Modelos de evaluación económica

Una vez analizados los tipos de análisis e indicadores utilizados en la evaluación económica, se analizan a continuación los modelos utilizados actualmente en la

evaluación de alternativas en infraestructura vial. Las principales características de los modelos revisados se resumen en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Modelos de evaluación económica

Características	
HDM-4	El HDM-4 (<i>Highway Development and Management</i>) es un sistema para la gestión de pavimentos desarrollado por el Banco Mundial que permite la evaluación económica de la conservación, construcción y mejora de caminos (Odoki y Kerali 2006).
HERS-ST	El modelo HERS-ST (<i>Highway Economic Requirements System-State Version</i>), desarrollado por la FHWA (<i>Federal Highway Administration</i>), permite el análisis coste-beneficio de alternativas de inversión en carreteras (FHWA 2002). La herramienta analiza tramos representativos de la red considerando distintas alternativas de mejora. Estos resultados se extrapolan a la red de carreteras. El modelo presenta la limitación de considerar únicamente operaciones de rehabilitación y reconstrucción, no incluyendo la preservación o el mantenimiento.
RealCost	Este modelo, desarrollado en EEUU por la FHWA, está basado en la evaluación de costes en el ciclo de vida (ACCV) recogida en la guía publicada por Walls y Smith (1998). Este modelo presenta la limitación de estar concebido para evaluar económicamente alternativas de diseño de pavimentos, no permitiendo evaluar alternativas de conservación.
Microbencost	Microbencost calcula los costes y beneficios derivados de siete tipos de inversiones en carreteras: aumento de capacidad, construcción de “bypass”, mejoras de intersecciones, rehabilitación de pavimentos, mejora de puentes, mejora en la seguridad y mejoras en pasos a nivel de líneas de ferrocarril (McFarland et al. 1993). Sin embargo, no permite evaluar alternativas de conservación.
RONET	El modelo RONET (<i>Road Network Evaluation Tools</i>) es una herramienta desarrollada en 2007 por el programa sub-sahariano de política de transporte (SSATP) para evaluar redes de pavimentos (Schutte 2008). RONET permite evaluar la condición de la red, el deterioro futuro considerando distintos estándares de conservación así como los costes a los usuarios.

FUENTE: Elaboración propia

A la vista de los antecedentes, se elaboró la Tabla 2-8 para comparar los análisis y conceptos considerados en los modelos actuales de evaluación económica. Como puede observarse, todos los modelos incluyen la evaluación de beneficios en sus análisis económicos, si bien no existe consenso en el tipo de análisis empleado. En cuanto a los costes y beneficios económicos, se detecta que varios los modelos no consideran en sus evaluaciones los costes de los usuarios (COV, TV y accidentes) ni las externalidades.

Tabla 2-8: Análisis y conceptos considerados en modelos de evaluación económica

Modelo evaluación económica	Análisis		Costes y beneficios considerados				
	ACB	ACE	Administración	TV y COV	Accidentes	Zona Trabajo	Externalidades
HDM-4	✓	✓	✓	✓	✓		✓
HERS-ST	✓	✓	✓	✓	✓		✓
RealCost	✓		✓	✓		✓	
Microbencost	✓		✓	✓	✓		
RONET	✓		✓	✓			

FUENTE: Elaboración propia

De los modelos revisados, únicamente el modelo RealCost incluye el efecto sobre los usuarios en las zonas de trabajo. Sin embargo, este modelo está diseñado para evaluar alternativas a nivel de proyecto, no resultando adecuado para la gestión a nivel de red. Esta misma limitación se comprueba en los modelos desarrollados específicamente para evaluar el efecto de zonas de trabajo tales como QUEWZ-98 o CA4PRS (Mallela y Sadasivam 2011).

e) Análisis de la evaluación económica

De la revisión del estado de la práctica se observa que los modelos económicos consideran, en todos los casos, el ACB o ACE. El ACCV no suele emplearse por estar limitado al estudio de alternativas con beneficios similares. Por su parte, el AF y

el AIE presentan objetivos diferentes a los anteriores y, por tanto, suelen desarrollarse de forma paralela e independiente.

Respecto a los indicadores, el ACB presenta la limitación de cuantificar monetariamente ciertos aspectos como los costes sociales. Esta limitación no la presenta el ACE, pues compara los beneficios de las distintas alternativas sin una evaluación económica; no obstante, requiere una metodología objetiva para definir la relación beneficio-condición a través, por ejemplo, de los modelos de deterioro.

Respecto a los modelos de evaluación económica, se detectan limitaciones en la consideración de los efectos sobre los usuarios. Tradicionalmente, las administraciones no evalúan estos efectos por la incertidumbre asociada a su cálculo y a la penalización que suponen estos costes, que además no tienen incidencia directa en los presupuestos (FHWA 2003). Sin embargo, estos costes pueden ser más importantes que los costes de administración (Delwar y Papagiannakis 2001; Labi y Sinha 2003), por lo que es necesario incluirlos en la evaluación. En el caso de los efectos en circulación normal, la complejidad de su cuantificación económica puede evitarse a través de análisis basado en efectividad.

Dado que una evaluación basada en efectividad permite incorporar de forma indirecta los beneficios a los usuarios derivados de una buena conservación de la infraestructura, resulta un indicador adecuado en aquellos casos en los que se disponga de los modelos de comportamiento. Se considerará, por tanto este indicador en la evaluación económica de la herramienta propuesta. A pesar de recomendar este indicador, su aplicación a un caso concreto requiere de un estudio más detallado de su idoneidad frente a otros indicadores.

2.1.3 Evaluación ambiental

Se distinguen dos grandes tipos de análisis para evaluación ambiental: los fundamentados en la norma de gestión ambiental ISO 14040 (ISO 2006) y los basados en sistemas de certificación ambiental.

Los basados en la norma ISO 14040 llevan a cabo un análisis del ciclo de vida (ACV), en el que se valora el impacto ambiental de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final. La principal característica de estos sistemas es que requieren cuantificar el consumo de recursos y las emisiones generadas por cada unidad funcional empleada en el proceso del ciclo de vida (ISO, 2006). En la guía desarrollada por Sampedro (2011) se detalla la aplicación de esta metodología a la evaluación ambiental de carreteras.

Por su parte, los sistemas de certificación ambiental están inspirados en certificaciones ambientales de vivienda tales como LEED y BREEAM. El sistema LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), ampliamente utilizado en Estados Unidos, otorga cuatro niveles de certificación a los proyectos (certificado, plata, oro o platino) en base a aspectos como: eficiencia energética, uso de energías alternativas y mejora de la calidad ambiental interior (USGBC 2014). De forma análoga, el sistema BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*), utilizado mayoritariamente en Europa, otorga cinco niveles de certificación (aceptable, bueno, muy bueno, excelente y excepcional)

(BRE 2014). A raíz de estos sistemas de certificación ambiental de viviendas, han surgido sistemas similares para su aplicación a proyectos de infraestructura vial.

Teniendo en cuenta esta clasificación, se presenta a continuación una revisión de los modelos de evaluación ambiental existentes para la gestión de infraestructura vial.

a) Modelos de evaluación ambiental

Si bien en la literatura se han desarrollado estudios para evaluar los beneficios ambientales derivados de emplear determinados materiales en la construcción y rehabilitación de pavimentos (Thenoux et al. 2007; Sanchez-Alonso et al. 2011; Silvestre et al. 2013a; b; Pérez-Martínez et al. 2014; Moreno-Navarro et al. 2014), esta sección se centra en los métodos de evaluación ambiental integrados en sistemas de gestión.

En base a esta premisa, la Tabla 2-9 recoge las principales características de los modelos basados en la ISO 14040, mientras que la Tabla 2-10 resume los modelos basados en sistemas de certificación ambiental.

Tabla 2-9: Modelos de evaluación ambiental basados en la ISO 14040

Modelo	Características
HDM-4	El HDM-4 evalúa el impacto ambiental considerando tres módulos: emisiones, ruido y balance energético (Bennett y Greenwood 2004). Los dos primeros consideran únicamente el impacto generado por la circulación de vehículos. La evaluación del balance energético es la única que considera las fases de construcción, conservación y rehabilitación. En esta evaluación se utilizan datos agregados, asignando a cada tratamiento un consumo energético por unidad de material utilizado. La principal limitación del modelo es que no considera el uso de materiales reciclados o nuevas tecnologías.
PaLATE	PaLATE (<i>Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects</i>) evalúa el impacto ambiental de los materiales y procesos empleados en las etapas de diseño, construcción y conservación de pavimentos (Nathman 2008; Nathman et al. 2009). Una de sus ventajas es que los datos que utiliza en la evaluación son datos abiertos (Nathman et al. 2009). La principal limitación del modelo es que estos datos son poco actualizados (Santero et al. 2010).
CHANGER	CHANGER (<i>Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse gas Emissions for Roads</i>) calcula las emisiones causadas por actividades de construcción de carreteras (Huang et al. 2013). Una de las limitaciones del modelo es que no considera actividades de conservación. Tampoco considera operaciones de reciclado.
Modelo británico	El modelo británico evalúa el impacto ambiental de la construcción y conservación de pavimentos, considerando el efecto de las zonas de trabajo (Huang et al. 2009a; b). La principal aportación de este modelo es la consideración de materiales reciclados. Sin embargo, su aplicación está limitada a pavimentos asfálticos.
ROAD-RES	La principal aportación de este modelo es que está enfocado al uso de residuos de incineración de residuos, permitiendo la comparación entre soluciones que emplean materiales vírgenes y reciclados (Birgisdóttir 2005). Esto podría considerarse, a su vez, su principal limitación, ya que reduce su aplicabilidad a este tipo de estudios.
Caltrans CAL B/C	Este método lleva a cabo una evaluación coste-beneficio en el que se pueden incluir los efectos ambientales de las alternativas en estudio (Booz-Allen & Hamilton Inc. 1999). Una de sus limitaciones es que no evalúa el efecto de las operaciones de conservación.

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 2-10: Modelos de evaluación ambiental basados en sistemas de certificación

Modelo	Características
CEEQUAL	CEEQUAL (<i>Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Award Scheme</i>) evalúa proyectos de ingeniería civil considerando aspectos como el uso de materiales, el consumo de energía y carbón, la gestión de residuos, etc. (Willettts et al. 2010). Se emplea normalmente para evaluar proyectos una vez finalizadas las fases de diseño y construcción, de forma que los datos necesarios para la evaluación están disponibles y son fiables (Huang et al. 2013).
GreenRoads	GreenRoads ha sido desarrollado para la evaluación de proyectos de construcción y conservación de carreteras (Muench et al. 2010). Se consideran, entre otros, el uso de materiales y recursos, el medio ambiente y el agua, el acceso y la equidad y las tecnologías.
GreenLITES	GreenLITES (<i>Green Leadership In Transportation Environmental Sustainability</i>) ha sido desarrollado por el Departamento de Transportes de Nueva York para certificar la sostenibilidad de los proyectos de diseño, operación y conservación de carreteras (NYSDOT 2013). Sus principios se apoyan en las certificaciones de GreenRoads y LEED. Considera criterios como el uso de materiales reciclados, el uso de productos sostenibles en la maquinaria y la restauración de arcenes para la seguridad de peatones y ciclistas.
GreenPave	Este sistema de evaluación de pavimentos está basado en los sistemas LEED, GreenRoads y GreenLITES, con una adaptación a pavimentos y a las prácticas empleadas en Ontario (Canadá). El objetivo de este sistema es potenciar el diseño y selección de alternativas de conservación sostenibles (Chan et al. 2012; MTO 2010).
BE2ST-in-Highways	BE2ST-in-Highways (<i>Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation-Infrastructure-Highways</i>) establece un sistema de acreditación basado en una puntuación que considera nueve categorías: uso de energía, GWP (<i>Global Warming Potential</i>), reciclado in situ, total de reciclado, consumo de agua, costes en el ciclo de vida, costes sociales, ruido del tráfico y residuos (RMRC 2013). La principal novedad de este modelo es que utiliza herramientas cuantitativas para evaluar cada una de las categorías, de forma que la puntuación obtenida en cada proyecto evaluado sea objetiva. Concretamente, la herramienta utiliza PaLATE para llevar a cabo la evaluación ambiental y RealCost para evaluar los costes en el ciclo de vida.

FUENTE: Elaboración propia

b) Análisis sobre la evaluación ambiental

En base a los antecedentes analizados, se detectan tres factores clave a la hora de evaluar la idoneidad de un modelo de evaluación ambiental:

- Disponibilidad y fiabilidad de datos: Este factor es especialmente importante en las evaluaciones basadas en el ACV, pues estos métodos requieren mayor cantidad de información y realizan evaluaciones con mayor nivel de detalle.
- Transparencia y claridad de las evaluaciones: El método de evaluación debe proporcionar una evaluación objetiva y transparente del impacto ambiental.
- Conceptos o criterios a incluir en la evaluación: Deben considerar las necesidades específicas del lugar de evaluación. Así, por ejemplo, se encuentran modelos con metodologías de evaluación similares que recogen las peculiaridades de distintas localizaciones (por ejemplo, GreenPave de Ontario frente al GreenLITE de Nueva York).

Si se disponen de datos fiables, los modelos de ACV proporcionan evaluaciones más precisas que los modelos de certificación, cuyas valoraciones no suelen basarse en indicadores de desempeño (RMRC, 2013). Los modelos de certificación resultan, por tanto, menos transparentes, prestándose a evaluaciones más subjetivas. Con todo, la valoración obtenida por métodos de certificación resulta más intuitiva que las evaluaciones de ACV, siendo más atractiva para transmitir los beneficios de iniciativas sostenibles a agentes menos especializados. Por lo tanto, el uso de modelos de certificación resulta beneficioso para una mayor difusión y entendimiento de la evaluación ambiental, pero se recomienda que se apoyen en indicadores objetivos obtenidos a partir de modelos de ACV.

Ante esta situación, se propone el uso de una evaluación basada en el ACV que entregue información del impacto ambiental derivado de las alternativas de

conservación en términos, por ejemplo, de emisiones de CO₂. La elección de un modelo específico para su cuantificación dependerá de las particularidades del caso de aplicación.

2.2 Optimización para la Asignación de Recursos de Conservación

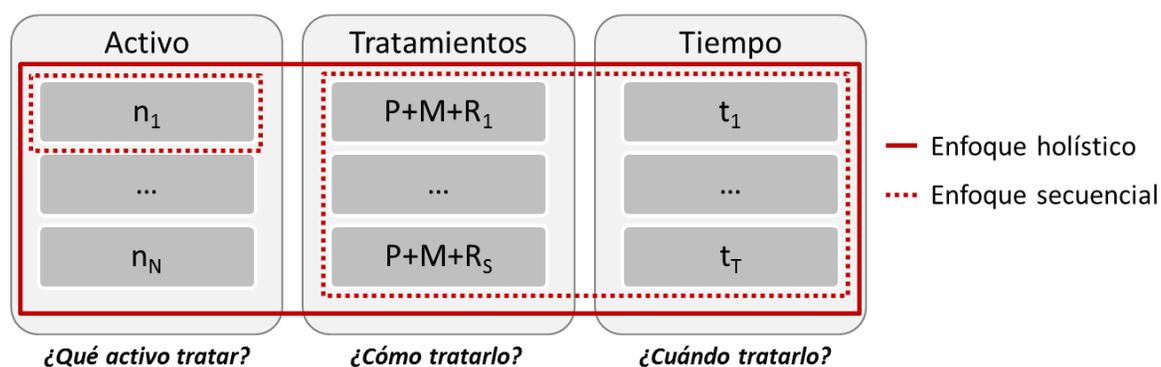
A la hora de resolver el problema de asignación de recursos de conservación, los SGI cuentan con módulos de ayuda a la toma de decisión. Desde la aparición de estos sistemas en la década de los 60, estos módulos han evolucionado, abordando el problema de asignación de recursos con mayores niveles de complejidad. Es por esto que algunos autores distinguen entre módulos de primera, segunda y tercera generación (Robinson et al. 1998).

La principal diferencia entre estos módulos reside la complejidad considerada en la toma de decisión; la cual viene determinada, fundamentalmente, por el número de alternativas y criterios considerados. El número de alternativas consideradas en la toma de decisión está estrechamente relacionado con el enfoque considerado para abordar el problema. Por su parte, la consideración de múltiples criterios en la toma de decisión puede abordarse a partir de distintas técnicas de decisión multicriterio.

En esta sección se analiza, en primer lugar, los enfoques y métodos empleados para la asignación de recursos de conservación en la gestión de infraestructura. En segundo lugar, se revisan y analizan las técnicas empleadas para la decisión multicriterio en gestión de infraestructura.

2.2.1 Enfoques y métodos

En líneas generales, se identifican dos enfoques para resolver el problema de asignación de recursos de conservación a nivel de red: secuencial y holístico (Haas et al. 1994; Zimmerman 1995). Estos enfoques difieren en la manera que abordan el problema, lo cual está relacionado con el número de alternativas consideradas.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 2-4: Enfoques secuencial y holístico en la asignación de recursos

El enfoque secuencial (Figura 2-4) trata el problema en dos fases: primero identifica la alternativa de conservación más adecuada a nivel de activo (considerando distintos tratamientos de preservación, mantenimiento y rehabilitación (P+M+R) y periodos de aplicación). A continuación, resuelve el problema a nivel de red, seleccionando los activos a tratar, cada uno de los cuales ya tiene definido su solución de tratamiento óptimo (Haas et al. 1994; Zimmerman 1995). Este enfoque secuencial considera $N \times S^T$ soluciones del problema (para una red de N activos, S posibles tratamientos y un periodo de análisis de T años).

Por su parte, el enfoque holístico (Figura 2-4) aborda el problema de asignación de recursos de conservación de forma global, sin definir previamente ninguna solución de tratamiento, tiempo de aplicación o activo (Haas et al. 1994; Zimmerman 1995). Aborda, por lo tanto, el problema general con $S^{N \times T}$ posibles soluciones (para una red de N activos, S posibles tratamientos y un periodo de análisis de T años).

Cuando el número de alternativas consideradas en el proceso es finito y discreto, el problema puede resolverse mediante una priorización. En la priorización se evalúan todas las posibles alternativas y se seleccionan las mejores de acuerdo a un listado ordenado establecido en base a un indicador de idoneidad. En el caso en que las alternativas consideradas sean similares, la selección óptima podría resolverse mediante una optimización, si bien la enumeración completa de alternativas y posterior priorización resulta intuitiva y fácil de comprender.

Sin embargo, cuando el número de alternativas es muy grande (lo cual es habitual cuando se aborda el problema con un enfoque holístico), no resulta viable evaluar todas las alternativas y es necesario diseñar un modelo matemático que optimice la solución cumpliendo ciertas restricciones (Murty 2010). Así, por ejemplo, si un ordenador pudiera enumerar 20 billones de soluciones en un solo segundo, se necesitaría poco menos de un minuto para evaluar las alternativas de conservación existentes en una red de cinco activos con dos alternativas de conservación en un periodo de diez años bajo un enfoque holístico. Sin embargo, si el número de activos considerados aumentara a siete, se necesitarían más de tres años para evaluar todas las alternativas posibles.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la asignación de recursos de conservación bajo un enfoque holístico plantea un problema “difícil de resolver”. La idea intuitiva de problema “difícil de resolver” queda reflejada en el término científico NP-hard, utilizado en el contexto de la complejidad algorítmica (Martí 2003).

Se puede considerar, además, que la asignación de recursos de conservación plantea un problema de optimización combinatoria. Estos problemas se caracterizan porque buscan encontrar un máximo (o mínimo) de una determinada función sobre un conjunto finito de soluciones (Martí 2003). En el caso del enfoque holístico, el conjunto de soluciones es finito (pues existen $S^{N \times T}$ posibles soluciones para una red de N activos, S tratamientos y un periodo de análisis de T años), pero toma valores muy elevados si se consideran largos periodos de análisis o grandes redes de activos.

Para resolver este problema existen diferentes métodos de optimización que pueden ser aplicados considerando tanto un enfoque secuencial como holístico. Dado que no existe un enfoque y/o método apropiado para todos los posibles escenarios (Zimmerman 1995), se presenta a continuación una revisión de los métodos disponibles y ejemplos de aplicación en la gestión de pavimentos.

a) Métodos de optimización y priorización

Los métodos de optimización y priorización pueden agruparse en cuatro clases: prioridad basada en prelación, métodos de programación matemática, métodos heurísticos y otros métodos. A continuación se describen cada una de estas clases incluyendo, además, ejemplos de aplicación a la gestión de pavimentos.

i) Prioridad basada en prelación

La priorización parte enumerando las alternativas a evaluar, las cuales se evalúan en base a un indicador para, finalmente, ordenar y seleccionar las alternativas a implementar. En la Tabla 2-11 se presentan distintos métodos de priorización agrupados en función del indicador utilizado para establecer la prelación (o ranking).

Tabla 2-11: Métodos de prioridad basada en prelación

Método	Características
Prelación basada en valoraciones subjetivas	Las alternativas se evalúan en base a un juicio subjetivo definido por la administración. Presenta la ventaja de ser rápido y sencillo, si bien puede estar sujeto a imparcialidad e inconsistencias, resultando soluciones que pueden estar alejadas de la óptima (Haas et al. 1994; Broten 1996). Este método se ha implementado recientemente en la gestión de pavimentos para la selección de los tramos a tratar en una red urbana en India (Shah et al. 2014).
Prelación basada en condición	Establece una prelación basada en la condición del activo. Resulta un criterio sencillo de asignación de recursos que además resulta intuitivo para la opinión pública (Zimmerman 1995; Broten 1996; Tan y Cheng 2012). Sin embargo, si no se consideran aspectos económicos, proporciona soluciones que pueden estar lejos de la óptima (Haas et al. 1994). Un caso de aplicación es el empleado por Reddy y Veeragavan (2001), donde utilizaron un índice de condición compuesto que considera el deterioro del pavimento, tráfico e información de expertos.
Prelación basada en evaluación económica	Permite comparar racionalmente las alternativas incluyendo en el análisis los costes (y, en su caso, beneficios). Siendo razonablemente sencillo de aplicar, proporciona soluciones más cercanas a la óptima que los métodos de prelación revisados anteriormente (Haas et al. 1994). Sin embargo, presenta la limitación de que pueden existir externalidades difícilmente cuantificables en términos económicos. Este método fue utilizado por Shah et al. (2014) para resolver el problema de asignación de recursos a una red de pavimentos utilizando un enfoque secuencial. Feighan et al. (1989) también lo implementaron para la selección de tramos en el sistema de gestión de pavimentos MicroPaver.

FUENTE: Elaboración propia

Si bien en la Tabla 2-11 se presentan únicamente tres criterios para la priorización de alternativas, es importante señalar que la tendencia actual pasa por la consideración integrada de múltiples criterios. Un ejemplo de esta tendencia es el trabajo de Jato-Espino et al. (2014b), en el que se evalúan, bajo criterios sociales, económicos y ambientales, tres alternativas de pavimentos urbanos considerando la metodología MIVES. La metodología MIVES fue originalmente propuesta por San-José y Garrucho (2010) y actualmente está incluida en la instrucción de hormigón estructural española para la evaluación ambiental de estructuras de hormigón (Aguado et al. 2012; Gómez-López et al. 2013). En este sentido, en la sección 2.2.2 se revisan, con más detalle, los métodos habitualmente utilizados en la gestión de infraestructura para la toma de decisión multicriterio.

La principal ventaja de los métodos de priorización es que son fáciles de aplicar y comprender por la opinión pública (Zimmerman 1995; Broten 1996; Tan y Cheng 2012). Sin embargo, la priorización se limita a un número reducido de alternativas; ya que en caso contrario, la enumeración total de alternativas resulta inabordable. Es por esto que la priorización no garantiza la solución óptima cuando los periodos de análisis son largos, ignorando así las necesidades futuras de la red (Meneses y Ferreira 2013).

ii) Métodos de programación matemática

Los métodos de programación matemática seleccionan las alternativas que maximizan o minimizan una determinada función objetivo cumpliendo unas restricciones. Los métodos más utilizados en la gestión de infraestructura son los recogidos en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12: Métodos de programación matemática

Método	Características
Programación lineal y no lineal	Encuentran la solución óptima del problema, que ha de estar definido por variables continuas que son función del tiempo. En la programación lineal, tanto la función objetivo como las restricciones, son funciones lineales dependientes del tiempo; mientras que en la programación no lineal, se admiten funciones que tengan una dependencia no lineal (Zimmerman 1995). Estos métodos se han aplicado para resolver el problema de asignación de recursos tanto bajo el enfoque holístico (Gao et al. 2012; de la Garza et al. 2011), como secuencial: selección de tratamientos y tiempo de aplicación (Gao y Zhang 2008) y la selección de activos (Amador-Jiménez y Mrawira 2009).
Programación entera	Simplifica el análisis considerando dos variables: la alternativa de no hacer nada o hacer algo (Zimmerman 1995). Se ha implementado para resolver el problema con un enfoque secuencial y holístico. Así, por ejemplo, Ng et al. (2011) lo utilizaron para optimizar el tratamiento y tiempos de aplicación. Por su parte, el HDM-4 lo incluye para seleccionar los tramos a tratar. Sin embargo, dada la complejidad de resolución, el HDM-4 limita su aplicación a un máximo de 100 tramos, 16 tratamientos y 5 años (Odoki y Kerali 2006). Respecto al enfoque holístico del problema, se encuentran dos aplicaciones: Ferreira et al. (2002) y Wang et al. (2003).
Programación dinámica	A grandes rasgos, resuelve problemas complejos dividiéndolos en subproblemas más sencillos. Se utiliza en situaciones que consideran decisiones en serie que impactan unas sobre otras. Feighan et al. (1989) la utilizaron en el sistema Micropaver para seleccionar el tratamiento y tiempo de aplicación. Otras aplicaciones bajo el enfoque secuencial lo han utilizado para seleccionar los activos a tratar (Farhan y Fwa 2012; Fwa y Farhan 2012). El método también ha sido aplicado bajo un enfoque holístico (Yoo y Garcia-Diaz 2008).

FUENTE: Elaboración propia

La principal ventaja de los métodos de programación matemática es que proporcionan la solución óptima al problema. Sin embargo, requieren largos tiempos de computación, lo que puede no ser viable para grandes redes de infraestructura con periodos de análisis prolongados.

iii) Métodos de optimización aproximada o heurísticos

Los métodos de optimización aproximada, también llamados heurísticos, son métodos que, si bien no aseguran encontrar la solución óptima al problema, proporcionan una solución lo suficientemente cercana a la óptima con un esfuerzo computacional menor que los métodos exactos (Zimmerman 1995). Estos métodos se basan en evaluaciones sucesivas que se van aproximando a la solución óptima del problema, la cual se obtendría con métodos de optimización exactos. En la Tabla 2-13 se presentan las características de distintos métodos de optimización aproximada.

Tabla 2-13: Métodos de optimización aproximada o heurística

Método	Características
Análisis incremental coste-beneficio	Analiza los beneficios ganados al seleccionar alternativas con mayores costes (Odoki y Kerali 2006), siendo ampliamente aplicado para resolver la selección de tramos en los sistemas de gestión de pavimentos (Haas et al. 1994) como por ejemplo el HDM-4. Sin embargo, el HDM-4 lo limita al análisis de redes con un máximo de 400 tramos, 17 tratamientos y 12 años de análisis (Odoki y Kerali 2006). Este método también se ha implementado para la priorización de proyectos de conservación en caminos no pavimentados (Chamorro 2012).
Heurísticas basadas en búsquedas secuenciales por entornos	Parten de una solución factible del problema y exploran el espacio de soluciones en búsqueda de mejores soluciones. Existen diversos métodos de búsqueda secuencial por entornos: gradiente, aceptación por umbrales, recocido simulado, etc. (Kirkpatrick et al. 1983; Dueck y Scheuer 1990). El método del gradiente fue aplicado por Tsunokawa et al. (2006) y Chou y Le (2011) para la selección del tratamiento y tiempos de aplicación óptimos en una sección de pavimento.
Algoritmos genéticos	Son métodos de búsqueda estocásticos que simulan la evolución biológica de la naturaleza guiada por el aprendizaje, la adaptación y la evolución (Elbeltagi et al. 2005). En cada iteración, estos algoritmos consideran una serie de soluciones de partida. Los algoritmos genéticos están considerados como uno de los métodos más aplicables para la resolución del problema de optimización de activos en gestión de infraestructuras (Flintsch y Chen 2004). Este método se ha implementado tanto con un enfoque holístico (Chootinan et al. 2006;

Método	Características
	Farhan y Fwa 2012; Meneses y Ferreira 2013) como con un enfoque secuencial: selección de tratamientos y tiempos de aplicación (Fwa y Farhan 2012) y selección de activos (Chan et al. 2003). Fwa et al. (1996) desarrollaron el modelo PAVENET-R para resolver el problema de asignación de recursos en una red de pavimentos utilizando algoritmos genéticos.

FUENTE: Elaboración propia

La principal ventaja de los métodos de optimización aproximada es que proporcionan soluciones cuasi-óptimas con mayor eficiencia computacional que los métodos de programación matemática. Por lo tanto, son capaces de abordar problemas complejos que tienen un gran número de variables; siendo así adecuados para abordar el problema de asignación de recursos de conservación. La principal limitación de estos métodos es que se desconoce en qué medida la solución proporcionada está alejada de la óptima. Es por esto que deben ser revisados periódicamente con métodos de programación matemática para comprobar que las soluciones obtenidas son suficientemente cercanas a las óptimas (Zimmerman 1995).

iv) Otros métodos considerados para la asignación de recursos

Además de los métodos de optimización y priorización presentados en las secciones anteriores, en la revisión del estado del arte se han identificado otros métodos para asistir en la toma de decisiones para la gestión de infraestructuras a nivel de red. A modo indicativo, en la Tabla 2-14 se recogen algunos de métodos que, dada su naturaleza, no pueden agruparse en las categorías anteriores.

Tabla 2-14: Otros métodos considerados en la asignación de recursos

Método	Características
Árboles de decisión	Se aplican en los SGI para identificar alternativas de conservación viables para distintos activos representativos de la red. En el caso de pavimentos, estos activos representativos se definen normalmente en base a la condición del pavimento, tipo de superficie y nivel de tráfico (Brotten 1996). Un buen ejemplo de aplicación este método es el trabajo de Wei y Tighe (2004), en el que desarrollan los árboles de decisión para la preservación de la red viaria de Ontario (Canadá).
Redes neuronales	Son modelos computacionales que tienen la habilidad de aprender de una serie de ejemplos para, posteriormente, hacer generalizaciones. La relación entre las variables de entrada y de salida de la red se establece implícitamente a partir del peso de las conexiones existentes en la red neuronal entrenada. Fwa y Chan (1993) desarrollaron una red neuronal para la priorización de tramos a conservar en una red de carreteras a partir de la condición de los tramos.
Lógica difusa	Permiten incorporar datos imprecisos y cualitativos en el proceso de toma de decisiones. Estos sistemas son adecuados para simular las opiniones de expertos porque manejan reglas lingüísticas de forma eficiente y asimilan adecuadamente pequeñas variaciones en los parámetros de entrada. En el trabajo de Moazami et al. (2011) se recoge el desarrollo de un sistema de priorización para la selección de tramos basado en lógica difusa.

FUENTE: Elaboración propia

La principal ventaja de los árboles de decisión es que, al abordar el problema de selección del tratamiento y tiempo de aplicación, permiten que, en la selección de activos, se evalúen únicamente alternativas viables de conservación. Sin embargo, esta ventaja es a la vez la principal limitación del método, ya que no resuelven el problema considerando el efecto de una decisión a nivel de red.

Por su parte, las redes neuronales identifican patrones de comportamiento, siendo especialmente adecuadas cuando se dispone de un gran número de ejemplos (Flintsch y Chen 2004). Sin embargo, resulta difícil entender el

camino seguido para llegar a una solución y, si bien son útiles para replicar un patrón de decisión, no garantizan la bondad de la decisión tomada.

Finalmente, la lógica difusa permite introducir reglas basadas en la experiencia o en la intuición. Sin embargo, no presentan algoritmos para aprender de los datos existentes (Flintsch y Chen 2004).

b) Análisis de enfoques y métodos

A partir de la revisión realizada, se analiza a continuación cuándo resulta conveniente implementar cada uno de estos métodos en un SGI teniendo en cuenta los posibles enfoques al problema. Para ello, en la Tabla 2-15 se resume el enfoque y el método implementado en las aplicaciones revisadas. La información recogida en esta tabla se complementa con la presentada en la Tabla 2-16, en la que se muestra en número de soluciones consideradas en los estudios revisados, así como el número de objetivos considerados en la toma de decisión.

En la Tabla 2-15 se pone de manifiesto la versatilidad de los métodos para resolver el problema utilizando los dos enfoques disponibles para abordar el problema (secuencial e holístico). Así, hay métodos (programación dinámica, por ejemplo) que pueden resolver el problema tanto bajo un enfoque secuencial, como bajo un enfoque holístico. También se detecta la posibilidad de combinar métodos. Por ejemplo, Fwa y Farhan (2012) utilizaron algoritmos genéticos para optimizar el tratamiento y tiempo de aplicación y, posteriormente, emplearon la programación dinámica para seleccionar los activos a tratar.

Tabla 2-15: Métodos de optimización y priorización en las aplicaciones revisadas

Método	Enfoque secuencial		Enfoque holístico	
	Selección tratamientos y tiempos	Selección activos		
Prioridad basada en prelación	Valoraciones subjetivas		Shah et al. (2014)	
	Condición pavimento	Giustozzi et al. (2012)	Reddy y Veeragavan (2001), Cafiso et al. (2002)	
	Económica	Giustozzi et al. (2012), Shah et al. (2014)	Feighan et al. (1989), Cafiso et al. (2002), Shah et al. (2014)	
Métodos programación matemática	Programación lineal y no lineal	Gao y Zhang (2008)	Amador-Jiménez et al. (2009)	Wu et al. (2009), de la Garza et al. (2011), Gao et al. (2012)
	Programación entera	Ng et al. (2011)	Odoki y Kerali (2006)	Ferreira et al. (2002), Wang et al. (2003)
	Programación dinámica	Feighan et al. (1989)	Farhan y Fwa (2012), Fwa y Farhan (2012)	Yoo y Garcia-Diaz (2008)
Métodos de optimización aproximada o heurísticos	Análisis incremental coste-beneficio	Odoki y Kerali (2006)	Odoki y Kerali (2006) Chamorro (2012)	
	Heurísticas búsquedas secuenciales por entornos	Tsunokawa et al. (2006), Chou y Le (2011)		<i>Oportunidad de mejora</i>
	Algoritmos genéticos	Fwa y Farhan (2012)	Chan et al. (2003), Farhan y Fwa (2012)	Fwa et al. (2000), Chootinan et al. (2006), Meneses y Ferreira (2013, 2015)
Otros métodos	Árboles de decisión	Wei y Tighe (2004)		
	Redes neuronales		Fwa y Chan (1993)	
	Lógica difusa		Moazami et al. (2011)	

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 2-16: Aspectos considerados en las aplicaciones revisadas

Autores	Problema			Soluciones	Criterios/Objetivos	
	N	S	T		Único	Múltiples
Amador-Jiménez et al. (2009)	3	-	30	3^{30}	✓	
Cafiso et al. (2002)	9	4	1	4^9		✓
Chan et al. (2003)	500	-	-	500	✓	
Chootinan et al. (2006)	35	4	10	$4^{35 \times 10}$		✓
Chou y Le (2011)	1	15	15	15^{15}		✓
Fahran y Fwa (2012)	150	4	1	150×4^1	✓	
Feighan et al. (1989)	14	5	15	14×5^{15}	✓	
Ferreira et al. (2002)	27	6	4	$6^{27 \times 4}$	✓	
Fwa y Chan (1993)	128	-	-	128	✓	
Fwa et al. (2000)	12	4	45	$4^{12 \times 45}$		✓
Fwa y Fahran (2012)	150	4	1	150×4		✓
Gao y Zhang (2008)	-	4	5	4^5	✓	
Gao et al. (2012)	3	4	10	$4^{3 \times 10}$		✓
de la Garza et al. (2011)	5	9	15	$9^{5 \times 15}$	✓	
Giustozzi et al. (2012)	1	6	50	6(*)		✓
Meneses y Ferreira (2013, 2015)	32	5	20	$5^{32 \times 20}$		✓
Moazami et al. (2011)	131	-	-	131	✓	
Ng et al. (2011)	-	4	10	4^{10}	✓	
Odoki y Kerali (2006) - Programación entera	100	16	5	100×16^5	✓	
Odoki y Kerali (2006) - Análisis incremental c-b	400	17	12	400×17^{12}	✓	
Reddy y Veeragavan (2001)	52	-	-	52	✓	
Shah et al. (2014)	21	4	10	21×4^{10}	✓	
Tsunokawa et al. (2006)	-	5	20	5^{20}	✓	
Wang et al. (2003)	10	5	5	$5^{10 \times 5}$		✓
Wei y Tighe (2004)	20	15	40	1540	✓	
Wu y Flintsch (2009)	4	4	10	$4^{4 \times 10}$		✓
Yoo y Garcia-Diaz (2008)	40	4	7	$4^{40 \times 7}$	✓	

FUENTE: Elaboración propia

Donde, N es el número de activos; S es el número de tratamientos; T es el periodo de análisis.

NOTA: El trabajo de Giustozzi et al. (2012) analiza un periodo de análisis de 50 años, si bien en ese periodo compara tres tratamientos considerando, para cada uno de ellos, dos estrategias de aplicación en el periodo de análisis. Es por esto que el número de soluciones evaluadas corresponde con esas seis estrategias.

Considerando las ventajas y limitaciones de los métodos y los posibles enfoques del problema (secuencial e holístico), se exponen a continuación una serie de recomendaciones para futuras implementaciones en SGI.

i) Enfoque secuencial

Este enfoque puede considerar todos los métodos revisados (priorización, programación matemática y optimización heurística). Si bien los métodos de priorización basados en prelación son empleados únicamente con el enfoque secuencial. Estos métodos permiten considerar de forma sencilla e intuitiva distintos criterios en la evaluación de alternativas. Sin embargo, pueden proporcionar soluciones alejadas de la óptima. Es por esto que el enfoque secuencial puede ser recomendable para analizar redes homogéneas o reducidas, en las que el nivel de servicio global de la red está poco comprometido con el nivel de servicio de cada uno de los activos.

ii) Enfoque holístico

Los métodos principalmente empleados con este enfoque son los de programación matemática y los heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entornos y algoritmos genéticos. Dada la complejidad de los métodos de programación matemática, las aplicaciones revisadas muestran una tendencia a simplificar el problema limitando el número de variables consideradas en la optimización (Tabla 2-16). Concretamente, la aplicación que considera un mayor número de soluciones es la desarrollada por Yoo y Garcia-Diaz (2008), que estudia un problema con $4 \cdot 10^{168}$ posibles soluciones. Por el contrario, los métodos heurísticos son capaces de abordar el problema con un enfoque holístico sin sacrificar su complejidad. En este caso, el problema considerado por Meneses y Ferreira (2013, 2015) es el más complejo, abarcando un problema con 10^{447} posibles soluciones.

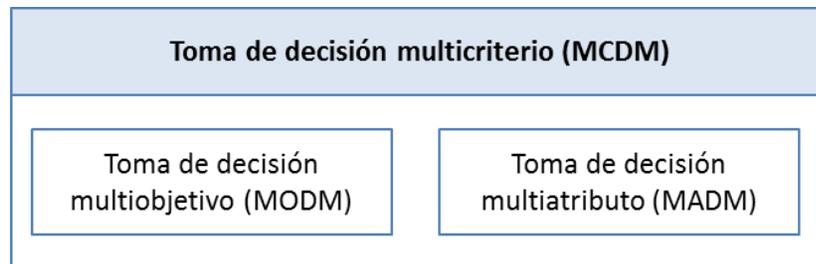
Sin embargo, tanto el problema abordado por Meneses y Ferreira (2013, 2015), como el resto de aplicaciones que han utilizado métodos heurísticos

basados en algoritmos genéticos (Fwa et al. 2000; Chootinan et al. 2006), han centrado su optimización en aspectos técnicos y económicos. Concretamente, los objetivos considerados en estos trabajos han sido: la minimización de costes de mantenimiento (Fwa et al. 2000; Chootinan et al. 2006; Meneses y Ferreira 2013, 2015); minimización de costes de usuarios (Meneses y Ferreira 2013); maximización de condición (Fwa et al. 2000; Chootinan et al. 2006) y maximización del valor residual (Meneses y Ferreira 2015). Se concluye, por tanto, que las aplicaciones desarrolladas con métodos heurísticos obvian el aspecto ambiental en el proceso de optimización. La optimización planteada en este trabajo de investigación busca cubrir esta carencia mediante la integración de criterios técnicos, económicos y ambientales en el diseño de programas de conservación a nivel de red.

Además, otra de las oportunidades de mejora detectadas en la revisión se fundamenta en la falta de trabajos que apliquen métodos heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entornos para resolver el problema bajo un enfoque holístico. Estos métodos han resultado muy eficaces para resolver problemas de optimización combinatoria en otros ámbitos como, por ejemplo, el diseño estructural (Martí et al. 2013a; Rao y Shyju 2010; Yepes et al. 2012; Torres-Machí et al. 2013); diseño de rutas de transporte (Yepes y Medina 2006; Mestria et al. 2013); diseño de redes de comunicación (Pedrola et al. 2013); diseño de parques eólicos (Yin y Wang 2012); y programación de proyectos (Anagnostopoulos y Koulinas 2012). De hecho, estos métodos han proporcionado resultados más robustos que los obtenidos con algoritmos genéticos (Martínez et al. 2010; Rao y Shyju 2010; Anagnostopoulos y Koulinas 2012; Yin y Wang 2012; Pedrola et al. 2013; Mestria et al. 2013) que, en cambio, han sido más utilizados en la gestión de infraestructura vial.

2.2.2 La decisión multicriterio en la gestión de activos de infraestructura

Tal y como se enunció en secciones anteriores, en la gestión sostenible de infraestructura se aspira a alcanzar múltiples objetivos: minimizar costes e impacto ambiental, maximizar la condición de la infraestructura, etc. Estos objetivos, sin embargo, suelen estar en conflicto, resultando difícil mejorar uno de ellos sin generar un impacto (normalmente negativo) en alguno de los restantes (Wu y Flintsch 2009; Wu et al. 2012). Se plantea, por tanto, un problema en el área de decisión multicriterio (MCDM, *Multi-Criteria Decision Making*), la cual abarca “*el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar (...) la efectividad, eficacia y eficiencia de los procesos de decisión, y a aumentar el valor añadido del conocimiento de los mismos*” (Moreno-Jiménez 1996).



FUENTE: Adaptado de Zavadskas et al. (2014)

Figura 2-5: Clasificación general de métodos en la toma de decisión multicriterio

Tal y como se recoge en la Figura 2-5, se distinguen dos grandes categorías en la toma de decisión multicriterio: la toma de decisión multiobjetivo (MODM, *Multi-Objective Decision Making*) que aborda problemas continuos; y la toma de decisión multiatributo (MADM, *Multi-Attribute Decision Making*), que resuelve problemas

discretos en los que el número de alternativas y criterios es finito (Triantaphyllou 2000; Zavadskas et al. 2014).

Si bien, tradicionalmente, se ha establecido esta distinción, es importante señalar que los métodos continuos (con muy ligeras modificaciones) pueden aplicarse a problemas de decisión discretos (Romero 1993). La distinción entre problemas continuos o discretos está relacionado con el número de alternativas consideradas en la decisión multicriterio y, por tanto, con el enfoque (secuencial u holístico) considerado al abordar el problema de asignación de recursos. Puesto que en esta investigación se aborda el problema de asignación de recursos bajo un enfoque holístico, en el cual existe un gran número de alternativas, parece más adecuado aplicar un método de optimización multiobjetivo.

a) Conceptos en la toma de decisión multiobjetivo

En términos generales, un problema de optimización multiobjetivo se define como:

$$\text{Minimizar } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})]^T \quad (2.2)$$

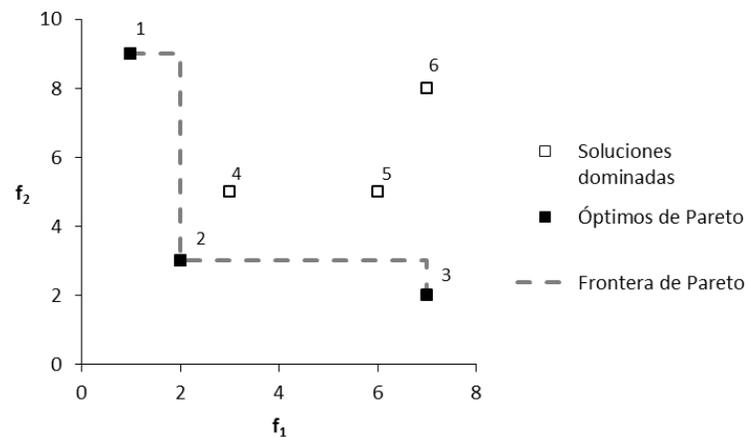
Sujeto a:

$$\begin{aligned} g_j(\mathbf{x}) &\leq 0; & j &= 1, 2, \dots, l \\ h_p(\mathbf{x}) &= 0; & p &= 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde n es el número de funciones objetivo, l es el número de restricciones con inecuaciones, y q es el número de restricciones de igualdad exacta. $\mathbf{x} \in E^m$ representa el vector de variables del problema de optimización, siendo m el número de variables independientes x_i del problema. $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in E^n$ es el vector de funciones objetivo $f_i(\mathbf{x})$.

El conjunto de soluciones \mathbf{x} que cumplen las restricciones del problema $\{\mathbf{x} | g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, l; y h_p(\mathbf{x}) = 0, p = 1, 2, \dots, q\}$ constituyen el espacio de soluciones factibles \mathbf{X} del problema de optimización.

Puesto que los objetivos considerados en la optimización multiobjetivo suelen estar en conflicto, es poco probable que exista una solución óptima para todos los objetivos considerados. Es por esto que, para ayudar en la toma de decisiones, se definen los llamados óptimos de Pareto (Pareto 1906) de la siguiente forma: “Un punto $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ es óptimo de Pareto si no existe ningún otro punto $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, tal que $f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x}^*)$, y $f_i(\mathbf{x}) < f_i(\mathbf{x}^*)$ para al menos una función objetivo.” Los óptimos de Pareto reciben también el nombre de soluciones no dominadas, ya que no existen soluciones mejores en todos los objetivos considerados.



FUENTE: Adaptado de Yepes (2002) y Payá (2007)

Figura 2-6: Definición de frontera de Pareto

El conjunto de óptimos de Pareto o soluciones no dominadas reciben el nombre de frontera de Pareto. Para aclarar este concepto, en la Figura 2-6 se muestra la frontera de Pareto resultante de un conjunto de seis soluciones factibles a un problema de optimización biobjetivo en el que se busca minimizar ambos objetivos (f_1 y f_2). De esta representación se puede concluir que la solución definida por el punto “1” es un óptimo de Pareto porque no existe otra solución que disminuya el valor de $f_2(1)$ sin

aumentar el de $f_i(I)$. Esta condición se cumple también para las soluciones representadas en los puntos “2” y “3”. Por el contrario, el resto de puntos (“4”, “5” y “6”), son dominados por la solución “2”.

Puesto que los objetivos en los problemas de optimización se evalúan en unidades no comparables (ej. coste en € y emisiones de CO₂ en kg), es habitual que los órdenes de magnitud varíen sustancialmente entre los distintos objetivos considerados. Para garantizar una comparación consistente de las soluciones respecto a los distintos objetivos, es necesaria una normalización de los valores obtenidos para cada función objetivo. De esta forma, todos los objetivos se evalúan en una escala común. Esta normalización es especialmente importante en aquellos métodos que combinan las funciones objetivo en un único indicador global. Si bien existen distintos métodos para la normalización de las funciones objetivo (Marler y Arora 2004), resulta especialmente intuitiva la normalización a escala 0-1, siendo 1 la mejor solución. En el caso en que el objetivo sea minimizar una función f_i , esta normalización viene recogida en la Ecuación (2.4). Si, por el contrario, se busca maximizar la función f_i , la función normalizada se obtiene a partir de la Ecuación (2.5).

$$\tilde{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{f_i^{max} - f_i(\mathbf{x})}{f_i^{max} - f_i^{min}}; \quad \text{si se busca minimizar } f_i \quad (2.4)$$

$$\tilde{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^{min}}{f_i^{max} - f_i^{min}}; \quad \text{si se busca maximizar } f_i \quad (2.5)$$

Donde, $\tilde{f}_i(\mathbf{x})$ es el valor normalizado en escala (0-1) de la solución \mathbf{x} respecto a la función objetivo f_i ; f_i^{max} es el valor máximo obtenido de la función objetivo f_i ; y f_i^{min} es el valor mínimo obtenido de la función objetivo f_i .

b) Técnicas de decisión multicriterio en la gestión de infraestructura

Dada la gran cantidad de técnicas disponibles para la decisión multicriterio, el objetivo de esta sección no es llevar a cabo una revisión exhaustiva de las mismas, sino centrar el análisis en las técnicas más utilizadas en el área de gestión de

infraestructura vial (Patidar et al. 2007; Wu et al. 2012). Para un mayor detalle sobre el uso de técnicas de decisión multicriterio en las áreas de construcción y gestión de proyectos, se proponen los trabajos de Alarcon y Bastias (1998), Marler y Arora (2004), Bastias y Molenaar (2005), Alarcón y Mourgues (2002), Jato-Espino et al. (2014a), Zavadskas et al. (2014) y Muñoz et al (2014).

En base a estas premisas, la Tabla 2-17 presenta la clasificación de las técnicas revisadas en esta sección. Si bien existen distintos métodos para clasificar las técnicas de decisión multicriterio (Triantaphyllou 2000; Zavadskas et al. 2014), una de las clasificaciones habituales (además de la diferenciación entre problemas continuos y discretos) se basa en cómo el tomador de decisiones articula su preferencia entre los criterios considerados, pudiendo esta ser: (1) a priori; (2) a posteriori; o (3) progresiva (Marler y Arora 2004; Wu et al. 2012). En el primero de los casos, el tomador de decisión expresa su preferencia entre criterios antes del proceso de optimización; mientras que en el segundo, la preferencia se establece tras la optimización, seleccionando así una única solución del conjunto de alternativas disponibles (Marler y Arora 2004). Finalmente, la articulación progresiva de preferencias es un proceso interactivo en el que el tomador de decisión define sus preferencias a medida que se ejecuta la optimización (Marler y Arora 2004).

Tabla 2-17: Clasificación de las técnicas de decisión multicriterio revisadas

Técnica de decisión multicriterio	Número de alternativas consideradas		Definición de preferencias	
	Infinitas (MODM)	Discretas (MADM)	A priori	A posteriori
Suma ponderada	✓	✓	✓	✓
Programación por metas	✓		✓	
Programación compromiso	✓		✓	
Método de la ε -restricción	✓			✓
Teoría multiatributo		✓	✓	
Proceso analítico jerárquico		✓	✓	

FUENTE: Elaboración propia

i) Suma ponderada

El método de suma ponderada consiste en combinar los distintos objetivos en un único indicador mediante la asignación de pesos a cada uno de los objetivos considerados (Marler y Arora 2004) (Ecuación (2.6)).

$$SP = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \tilde{f}_i(\mathbf{x}); \quad \text{con } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \text{ y } w_i > 0 \quad \forall i \quad (2.6)$$

Donde, SP es el valor obtenido en la suma ponderada; w_i es el peso asignado al objetivo i y $\tilde{f}_i(\mathbf{x})$ es el valor normalizado de la solución \mathbf{x} respecto a la función objetivo f_i .

Tal y como se indica en la Tabla 2-17, esta técnica puede utilizarse tanto con una definición a priori de preferencias como con una definición a posteriori de las mismas. En el primero de los casos, esta técnica define una única solución del problema, que refleja la preferencia del tomador de decisión entre los objetivos considerados. En el trabajo publicado por Marler y Arora (2010), se profundiza en la aplicación de este enfoque incluyendo recomendaciones a la hora de asignar los pesos con una definición a priori de preferencias.

El uso de la suma ponderada con una definición a posteriori de preferencias permite explorar soluciones del problema multiobjetivo con una variación paramétrica de los pesos. Este enfoque presenta la ventaja de permitir combinar la suma ponderada con otros algoritmos de optimización (Wu et al. 2012). En este enfoque, el tomador de decisión cuenta con un conjunto de soluciones no dominadas, obtenidas con una variación paramétrica de los pesos. El tomador de decisión puede evaluar la idoneidad de este conjunto de soluciones considerando otras técnicas de decisión multicriterio. Tal es el caso de los trabajos de Wu y Flintsch (2009) y Meneses y Ferreira (2013, 2015), los cuales definen la frontera de Pareto considerando una suma ponderada de los objetivos y una variación paramétrica de sus pesos relativos para, a continuación, seleccionar una de las soluciones del problema multiobjetivo con una programación por compromiso.

ii) Programación por metas

Este método establece una meta b_i a cada una de las funciones objetivo $f_i(\mathbf{x})$. El método busca minimizar la desviación total a las metas $\sum_{i=1}^n |d_i|$, donde d_i es la desviación respecto a la meta b_i de la función objetivo $f_i(\mathbf{x})$ (Marler y Arora 2004).

Este método ha sido utilizado por Fwa y Farhan (2012) para asignar el presupuesto entre distintos tipos de activo considerando buscando una distribución homogénea de los recursos.

iii) Programación por compromiso

Este método busca soluciones cercanas a la denominada solución ideal. La solución ideal (también llamada utópica), viene definida por aquella solución que consigue el menor valor posible para todas las funciones objetivo consideradas. Es decir, una solución \mathbf{x}^o es ideal si para cada uno de los objetivos $i = 1, 2, \dots, n$ el valor de las funciones objetivo es el mínimo posible $\mathbf{f}(\mathbf{x}^o) = \text{mínimo}\{f_i(\mathbf{x}^o) | \mathbf{x}^o \in \mathbf{X}\}$ (Marler y Arora 2004).

En general, la solución ideal \mathbf{x}^o no es alcanzable, por lo que el método de programación por compromiso busca la solución más cercana a la solución ideal. La cercanía a esta solución ideal puede cuantificarse con diferentes métricas, siendo la distancia euclídea $N(\mathbf{x})$ (definida en la Ecuación (2.7) (Marler y Arora 2004)) una de las métricas más utilizadas.

$$N(\mathbf{x}) = |\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) - \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}^o)| = \left\{ \sum_{i=1}^n [\tilde{f}_i(\mathbf{x}) - \tilde{f}_i(\mathbf{x}^o)]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.7)$$

Donde, $\tilde{f}_i(\mathbf{x})$ es el valor normalizado de la solución \mathbf{x} respecto a la función objetivo f_i ; y $\tilde{f}_i(\mathbf{x}^o)$ es el valor normalizado de la solución ideal \mathbf{x}^o respecto a la función objetivo f_i .

Este método ha sido aplicado por Fwa et al. (2000) para la optimización del programa de conservación anual de una red de pavimentos. En esta aplicación, la programación por compromiso se combinaba con el método de optimización de algoritmos genéticos. También lo emplearon Wu y Flintsch (2009) y Meneses y Ferreira (2013, 2015) para elegir la solución óptima de un conjunto de soluciones no dominadas obtenidas con una suma ponderada de objetivos.

iv) Método de la ε -restricción

Este método optimiza únicamente una de las funciones objetivo $f_s(\mathbf{x})$, convirtiendo el resto de funciones objetivo en restricciones del problema de tal forma que $l_i \leq f_i(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_i$, con $i = 1, 2, \dots, n$ y $i \neq s$ (Marler y Arora 2004). l_i y ε_i son, respectivamente, los límites superior e inferior de la función objetivo $f_i(\mathbf{x})$.

Un ejemplo de aplicación de este método puede encontrarse en el trabajo de Chowdhury et al. (2000), en el que se optimiza la asignación de presupuestos para mejorar la seguridad en carreteras.

v) Teoría multiatributo

La teoría multiatributo se basa en un marco matemático por el cual las funciones objetivo se combinan en un indicador de idoneidad global que recoge la importancia de cada uno de los objetivos a través de una función de utilidad (Wu et al. 2012).

El trabajo de Giustozzi et al. (2012) es un ejemplo de aplicación de estas técnicas para consideración conjunta de criterios económicos, técnicos y ambientales en la elección de tratamientos de preservación para carreteras.

vi) Proceso analítico jerárquico

Este método, también conocido como AHP por sus siglas en inglés (*Analytic Hierarchy Process*), es una técnica matemática cuyo objetivo es simular cómo piensan los tomadores de decisiones (Saaty 1990). El método se basa en la comparación por pares de los objetivos considerados en la optimización, evaluándolos en una escala de 1 a 9, expresando 1 igual importancia entre ambos criterios y 9 extrema importancia de un objetivo respecto al otro (Saaty 1990).

El método del AHP se aplica en el trabajo de Cafiso et al. (2002), donde evalúan proyectos de carretera considerando criterios económicos, sociales, ambientales, estratégicos, confort y de seguridad.

c) Análisis de las técnicas de decisión multicriterio

Una vez introducidas las técnicas para la optimización multiobjetivo, en la Tabla 2-18 se presentan las principales ventajas y limitaciones de cada una de ellas.

Tabla 2-18: Ventajas y limitaciones de las técnicas de decisión multicriterio

Técnica	Ventajas	Limitaciones
Suma ponderada	Sencillez de aplicación e implementación. Compatible con muchos algoritmos, pudiéndose establecer los pesos antes o después del proceso de optimización.	La selección de pesos previa a la optimización no garantiza que se obtenga una solución óptima. La variación continua y consistente de pesos no garantiza que se encuentre una frontera de Pareto uniforme.
Programación por metas	Permite analizar elementos esenciales del problema y formularlo con valores deseados y restricciones.	La convergencia al óptimo no está garantizada.

Técnica	Ventajas	Limitaciones
Programación por compromiso	Reduce el conjunto de óptimos de Pareto, resultando un método comprensible.	Alta dependencia de los pesos asignados a los distintos objetivos.
Método ϵ -restricción	Conceptualmente sencillo de entender y de implementar.	La selección inadecuada de ϵ puede conducir a formulaciones sin soluciones factibles.
Teoría multi-atributo	Capaz de cuantificar las preferencias del tomador de decisión entre los objetivos.	Dificultad de construir las funciones de utilidad en una aplicación práctica real.
AHP	Permite incorporar juicios subjetivos en la toma de decisión. Sencillo de entender e implementar.	Proceso de comparación largo si el número de alternativas u objetivos a evaluar es muy grande. Dificultad para abordar la incertidumbre introducida en la evaluación de las preferencias.

FUENTE: Adaptado de Wu et al. (2012)

Respecto a la aplicación de métodos de optimización multiobjetivo en la gestión de infraestructura vial, se observa que la mayoría de aplicaciones revisadas en la sección anterior (Tabla 2-16) consideran un único criterio. En aquellas aplicaciones que, por el contrario, se han considerado múltiples criterios, se observa que el método más utilizado es el de suma ponderada (Tabla 2-19). En diversas aplicaciones, de hecho, esta técnica se ha combinado con otras (como, por ejemplo, la programación por compromiso) para abordar el problema multiobjetivo.

Tabla 2-19: Técnicas multicriterio consideradas en las aplicaciones revisadas

Autores	MADM		MODM			
	AHP	Teoría multiatributo	Suma ponderada	Prog. por metas	Prog. Compromiso	Otros
Cafiso et al. (2002)	✓					
Chootinan et al. (2006)			✓			
Chou y Le (2011)						✓
Fwa et al. (2000)					✓	
Fwa y Fahran (2012)				✓		
Gao et al. (2012)			✓			
Giustozzi et al. (2012)		✓				
Meneses y Ferreira (2013)			✓		✓	
Meneses y Ferreira (2015)			✓		✓	
Wang et al. (2003)			✓			
Wu y Flintsch (2009)			✓		✓	

FUENTE: Elaboración propia

Diversos autores señalan que, a la hora de resolver problemas de optimización multiobjetivo, ninguna de las técnicas es claramente mejor que el resto, por lo que la selección de la técnica más adecuada depende del tipo de información disponible, las necesidades en la resolución del problema y la disponibilidad de herramientas informáticas (Marler y Arora 2004; Meneses y Ferreira 2013, 2015). El método de suma ponderada presenta la ventaja de poder combinarse con distintos algoritmos de optimización (Wu et al. 2012). Esta ventaja, junto con la sencillez y facilidad de su implementación, hace que sea uno de los métodos más utilizados en la gestión de infraestructura. Es por esto que, si bien recientemente existen potentes algoritmos para abordar problemas de optimización multiobjetivo, el método de suma ponderada continúa teniendo, en la actualidad, una amplia aplicación (Marler y Arora 2010).

Los trabajos desarrollados por Meneses y Ferreira (2013, 2015) en el área de gestión de infraestructura son una muestra de la aplicación de esta técnica. Estos trabajos utilizan el método de suma ponderada para explorar soluciones del problema multiobjetivo con una variación paramétrica de los pesos considerando, por tanto,

una definición a posteriori de las preferencias. Esta técnica también se ha aplicado recientemente en otros campos de la ingeniería. Tal es el caso de las aplicaciones presentadas por Islam et al. (2015) y Karmellos et al. (2015), en las que optimizan el diseño de estructuras de edificación residencial bajo criterios económicos y ambientales; y la presentada por Lyu et al. (2015), en la que se optimiza el diseño de instalaciones de refrigeración. Este enfoque también lo utilizaron Zhu et al. (2013) para el diseño de uniones y Ramesh et al. (2012) para resolver el problema de planificación de potencia reactiva.

A la vista de estos antecedentes, se puede concluir que la suma ponderada es una técnica competitiva para abordar el problema de optimización multiobjetivo presentado en este trabajo de investigación.

2.3 Limitaciones y Oportunidades de Mejora

De los métodos y aplicaciones revisadas se pueden extraer las siguientes conclusiones y limitaciones del estado del arte y la práctica:

- En la evaluación económica, se identifican distintos indicadores para la evaluación de alternativas de conservación. Estos se diferencian por los conceptos (costes y/o beneficios) incluidos en la evaluación y por el tipo de cuantificación de los mismos (monetaria o en términos de efectividad).
- La efectividad, evaluada en términos del área bajo la curva de deterioro de la infraestructura, permite incorporar de forma indirecta los beneficios a los usuarios derivados de una buena conservación. Dada la complejidad de cuantificar estos beneficios en términos económicos, la efectividad resulta un indicador adecuado en aquellos casos en los que se disponga de los modelos de comportamiento de la infraestructura. Se considerará, por tanto este indicador en la evaluación económica de la herramienta propuesta.

- Se identifican dos tipos de análisis en la evaluación ambiental de proyectos de infraestructura vial: los basados en la norma ISO 14040 y los de certificación ambiental. Los primeros proporcionan una evaluación más precisa pero requieren gran cantidad de datos. Los segundos, siendo más intuitivos y fáciles de asimilar por agentes menos especializados, no se basan en indicadores de desempeño, por lo que pueden introducir valoraciones subjetivas en la evaluación.
- Únicamente dos de los modelos revisados, HDM-4 y PaLATE, incorporan análisis económico-ambientales en la evaluación de alternativas. Sin embargo, el HDM-4 no evalúa el uso de materiales reciclados o nuevas tecnologías, mientras que el PaLATE no considera el efecto sobre los usuarios en la evaluación económica. Es por tanto necesario desarrollar un indicador que permita evaluar, de forma integrada, aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura.
- La optimización y priorización de inversiones de conservación a nivel de red puede resolverse con un enfoque secuencial u holístico. El primero supone una simplificación del problema y utiliza métodos basados principalmente en la priorización de soluciones. En cambio, el enfoque holístico es una solución global del problema obteniendo la combinación óptima de selección de activos, tratamiento y tiempo de aplicación.
- La resolución del problema de asignación de recursos con un enfoque holístico suele resolverse con métodos de programación matemática o métodos heurísticos.
- Los métodos de programación matemática proporcionan la solución óptima al problema, pero presentan la limitación de requerir un elevado esfuerzo computacional. Es por esto que la optimización matemática se aplica en casos simplificados del problema.
- Los métodos heurísticos (basados en búsquedas secuenciales por entornos o en algoritmos evolutivos) presentan la ventaja de abordar problemas

complejos de optimización con un esfuerzo computacional menor que los métodos de programación matemática. A pesar de que no aseguran que la solución encontrada sea la óptima, son capaces de proporcionar soluciones cercanas a la óptima abordando el problema de asignación de recursos a nivel de red sin necesidad de realizar simplificaciones.

- De la revisión de los métodos y enfoques aplicados para la optimización y/o priorización de inversiones de conservación a nivel de red se detecta la falta de aplicaciones de métodos heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entornos para resolver el problema con un enfoque holístico. Dada la eficiencia de estos métodos para resolver problemas de optimización combinatoria en otros campos de la ingeniería, se detecta la oportunidad de aplicar métodos de optimización heurísticos para resolver el problema de asignación de recursos de conservación a nivel de red.
- Las aplicaciones de optimización existentes están mayoritariamente centradas en la consideración de un único objetivo, obviando así la naturaleza compleja y multiobjetivo del problema real. De la revisión de técnicas para la optimización multiobjetivo se concluye que ninguno de las técnicas existentes es claramente mejor que el resto. La selección de la técnica más apropiada se analizará en base a un caso específico de aplicación.

3 HERRAMIENTA PARA LA OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MULTI OBJETIVO EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS

Una vez identificadas las limitaciones del estado del arte, se detecta la oportunidad de desarrollar una herramienta de optimización heurística multiobjetivo para la gestión de activos de transporte terrestre. Esta herramienta busca optimizar el programa de conservación de una red de infraestructura vial considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura. De acuerdo al alcance de la investigación presentado en el capítulo 1, esta herramienta se centra en la etapa de explotación, teniendo como objetivo una asignación óptima y sostenible de los recursos disponibles para la conservación de la red.

En este capítulo se define en primer lugar el problema de optimización, identificando las funciones objetivo, variables, parámetros y restricciones del problema. En segundo lugar se define el diseño conceptual de la herramienta, en el que se identifican los módulos que componen la herramienta y cómo se relacionan estos módulos en el proceso de optimización. A continuación se presentan una serie de consideraciones para la aplicación de algoritmos de optimización heurística para resolver el problema de asignación recursos de conservación. Finalmente se presentan los algoritmos de optimización heurística considerados en este trabajo de investigación.

3.1 Definición del Problema de Optimización

En términos generales y de acuerdo a lo presentado en la sección 2.2.2, un problema de optimización multiobjetivo consiste en encontrar el valor de las variables $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, que hagan mínima (o máxima) simultáneamente una serie de n funciones objetivo (f_n , definidas en (3.1)) cumpliendo unas restricciones (g_j y h_p definidas en (3.2) y (3.3)).

Funciones objetivo:

$$\left. \begin{array}{l} \min(o \max) f_1(\mathbf{x}) \\ \min(o \max) f_2(\mathbf{x}) \\ \dots \\ \min(o \max) f_n(\mathbf{x}) \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 ; \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (3.2)$$

$$h_p(\mathbf{x}) = 0 ; \quad p = 1, 2, \dots, q \quad (3.3)$$

Donde $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ son las variables del problema de optimización.

3.1.1 Funciones objetivo

La herramienta de optimización propuesta asiste en el diseño de programas de conservación considerando, simultáneamente, dos objetivos: maximizar la efectividad a largo plazo de la inversión en conservación y minimizar el impacto ambiental generado por las acciones de conservación.

Tal y como se definió en el capítulo 2, la efectividad de un programa de conservación puede evaluarse a partir del área bajo la curva de comportamiento y un umbral mínimo de condición (Ecuación (3.4)). Al considerar la condición de la infraestructura en la evaluación, esta función objetivo incorpora aspectos técnicos y económicos en el proceso de gestión; ya que, de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.1.2, la efectividad mide, de forma indirecta, los beneficios derivados de una buena conservación de la infraestructura.

$$\max f_1(\mathbf{x}) = \max \sum_{n=1}^N ABC_n = \max \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^T (IC_n(t) - IC_{min,n}) dt \quad (3.4)$$

Donde, ABC_n es la efectividad del programa del activo n ; $IC_n(t)$ es el índice de condición del activo n en el año t ; $IC_{min,n}$ es el índice de condición mínimo exigido al activo n .

Es importante señalar que, si bien la formulación propuesta para evaluar la efectividad del programa de conservación (Ecuación (3.4)) considera un único indicador de condición, también sería posible considerar un conjunto de indicadores. En ese caso, sería necesario disponer de los modelos de deterioro y el efecto de la aplicación de los tratamientos en cada uno de estos indicadores. De forma análoga a la expresada anteriormente, en este caso general, la función objetivo consistiría en maximizar la suma ponderada del área encerrada por cada uno de estos indicadores.

Por su parte, la minimización del impacto ambiental se cuantifica a partir de las emisiones de CO_2 generadas por la aplicación de los tratamientos de conservación (Ecuación (3.5)). Es importante señalar que en esta evaluación podrían considerarse otros indicadores ambientales tales como consumo energético, consumo de recursos,

emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x), etc. Sin embargo, puesto que las emisiones de CO_2 constituyen la principal fuente de gases de efecto invernadero (IPCC 2007), se han considerado estas emisiones como indicador ambiental en el presente trabajo de investigación. En cualquier caso, la metodología propuesta en este trabajo podría utilizarse de forma análoga considerando otros indicadores ambientales.

$$\min f_2(\mathbf{x}) = \min \sum_{n=1}^N (\text{CO}_2)_n \quad (3.5)$$

Donde, CO_{2n} son las emisiones de dióxido de carbono generadas por el programa de conservación del activo n .

Así mismo, es importante señalar que en este trabajo de investigación no se ha considerado el impacto ambiental derivado de la circulación de los vehículos. En base a los estudios de Kalembo et al. (2012) y Wang et al. (2012), que han identificado un aumento de emisiones de CO_2 debido a una mala condición del pavimento, la consideración de estas emisiones supondría una mejora en la estimación propuesta. Sin embargo, la mayoría de modelos utilizados actualmente para cuantificar el efecto de la condición en las emisiones de CO_2 basan sus estimaciones en el incremento de consumo de combustible, el cual está directamente relacionado con la regularidad superficial del pavimento (evaluada en términos de IRI) y la velocidad de circulación (Bennett y Greenwood 2004; Kalembo et al. 2012; Santos et al. 2015). Estos modelos podrían, por lo tanto, incorporarse a la evaluación ambiental propuesta en aquellos casos en los que el IRI sea un indicador adecuado para evaluar la condición de la infraestructura. Este sería el caso, por ejemplo, de los

pavimentos interurbanos, en los que el IRI es uno de los principales indicadores de condición.

Sin embargo, dos estudios recientes realizados por Santero et al. (2013) y Pellecuer et al. (2014) han concluido que la reducción de emisiones derivada de la aplicación de tratamientos de conservación es significativamente inferior a la esperada; llegando incluso a calificarla como mínima y poco efectiva (Santero et al. 2013; Pellecuer et al. 2014). Ante estos resultados, varios autores apuntan la necesidad de mejorar los modelos existentes para incluir el efecto de las operaciones de conservación en la mejora en la condición del pavimento y, por tanto, en la reducción de emisiones (Faghih-Imani y Amador-Jimenez 2013; Santero et al. 2013).

Ante esta necesidad, y teniendo en cuenta que la herramienta de optimización propuesta ya considera la condición del pavimento en otra de las funciones objetivo (Ecuación (3.4)), la evaluación del impacto ambiental propuesta en este trabajo se ha centrado en las emisiones derivadas de la aplicación de los tratamientos de conservación. Esta evaluación, también utilizada en estudios previos de gestión de pavimentos (Giustozzi et al. 2012; Faghih-Imani y Amador-Jimenez 2013; Gosse et al. 2013), pretende reflejar los beneficios ambientales derivados de la aplicación de tratamientos más respetuosos con el medioambiente como, por ejemplo, el reciclado de pavimentos.

3.1.2 Restricciones

El problema de optimización para la asignación de recursos de conservación considera restricciones tanto económicas como técnicas. La restricción económica refleja la limitación presupuestaria de la administración que gestiona la red en el periodo de análisis considerado. Esta restricción exige, por tanto, que el coste del programa de conservación no exceda el presupuesto disponible en cada año del periodo de análisis (Ecuación (3.6)). La restricción técnica, en cambio, exige un nivel mínimo de condición para todos los tramos de la red; de forma que estos presenten, en todos los años del periodo de análisis, una condición superior a una condición mínima definida a nivel estratégico (Ecuación (3.7)).

$$g_1(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N \text{coste}(x_n) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \leq B(t); \forall t \quad (3.6)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = IC_n(t) \geq IC_{min,n}; \forall t \text{ y } \forall n \quad (3.7)$$

Donde t es el año de análisis (con $t \leq T$, siendo T el periodo de análisis); n es el activo bajo análisis (con $n \leq N$, siendo N el número activos en la red); $\text{coste}(x_n)$ es el coste del tratamiento x aplicado en el activo n ; $\frac{1}{(1+i)^t}$ es el factor de actualización de costes para una tasa de descuento i en el año t ; $B(t)$ es el presupuesto disponible para tratar la red el año t ; $IC_n(t)$ es el índice de condición del activo n en el año t ; y $IC_{min,n}$ es la condición mínima exigida para el activo n .

3.1.3 Variables

Las variables del problema de optimización definen el programa de conservación de la red identificando los tratamientos que deben aplicarse a cada activo, en cada año del periodo de análisis. En el caso de una red compuesta por N activos analizados durante un periodo de análisis de T años, existe un total de $m = NxT$ variables, las cuales definen una solución del problema de optimización.

Puesto que la herramienta propuesta permite analizar alternativas de conservación de distinta naturaleza (ej. li sellado de grietas, recrecido funcional, etc.), las variables son discretas y pueden tomar S_n posibles valores, siendo S el número de alternativas de tratamiento posibles para cada activo n (Figura 1-7). Dado un conjunto de valores de estas m variables, queda definida una solución particular del problema, de la que puede obtenerse el valor de las funciones objetivo (Ecuaciones (3.4) y (3.5)).

3.1.4 Parámetros

Los parámetros son aquellas magnitudes tomadas como dato del problema y cuyo valor permanece constante durante el proceso de optimización. A continuación se describen los parámetros considerados en este trabajo de investigación. En el capítulo 4, en el que se aplica la herramienta propuesta a un caso de estudio, se detalla un ejemplo de estos parámetros.

- Parámetros de inventario: Recoge información de las características de la red tales como segmentación, que determina el número de activos a

analizar, el tipo de infraestructura, la longitud de cada activo, el tráfico, el clima y la jerarquía.

- Parámetros técnicos: Incluyen información de la condición inicial de los activos, evaluada con los indicadores definidos a nivel estratégico y su modelo de deterioro. También incluyen el catálogo de tratamientos posibles para cada activo de la red, los umbrales de condición en los que estos pueden aplicarse y el efecto los mismos en la condición.
- Parámetros económicos: Recogen los costes directos de aplicación de las operaciones de conservación ($coste(s_n)$, siendo s_n la alternativa de conservación s para el activo n).
- Parámetros ambientales: Recogen información de a las emisiones de dióxido de carbono generadas por cada una de las operaciones de conservación ($CO_2(s_n)$, siendo s_n la alternativa de conservación s para el activo n).
- Decisiones tomadas a nivel estratégico: Incluye la condición mínima exigida a los activos de la red así como el presupuesto disponible y su evolución en el tiempo ($B(t)$), el periodo de análisis (T) y la tasa de descuento (i) a aplicar en la evaluación económica.

3.2 Diseño Conceptual de la Herramienta de Optimización

La herramienta de optimización propuesta consta de cuatro componentes principales que se definen a continuación y cuya interacción se refleja en la Figura 3-1.

- Parámetros del problema de optimización: son datos que recogen información relativa al inventario de la red, las decisiones estratégicas de la gestión, así como parámetros técnicos, económicos y ambientales. Puesto que estos datos no varían en el proceso de optimización, constituyen los parámetros del problema de optimización.

- Módulos de evaluación: En estos módulos se lleva a cabo la evaluación técnica, económica y ambiental de las alternativas de conservación. En el módulo de evaluación técnica se estima la condición de la infraestructura en el tiempo (valor a partir del cual puede determinarse la efectividad del programa de conservación, según lo establecido en la Ecuación (3.4)). Por su parte, en el módulo de evaluación económica se determina el flujo de costes en el periodo de análisis, de forma que este se compara con el presupuesto disponible para la conservación de la red. Finalmente, el módulo de evaluación ambiental cuantifica el impacto del programa de conservación medido en términos de las emisiones de CO₂ generadas de la aplicación de los tratamientos.
- Proceso de optimización: Este proceso busca una gestión más sostenible de los recursos disponibles para la conservación de la red. A partir de los parámetros del problema y de los módulos de evaluación técnica, económica y ambiental, el proceso de optimización define el programa de conservación que optimiza las funciones objetivo: maximizar la efectividad y minimizar las emisiones de CO₂ (Ecuaciones (3.4) y (3.5)) cumpliendo, además, las restricciones técnicas y económicas del problema (Ecuaciones (3.6) y (3.7)).
- Resultados: Teniendo en cuenta los procesos antes descritos, la herramienta permite definir el programa de conservación óptimo para gestionar la red. Puesto que la optimización propuesta es multiobjetivo, el programa de conservación óptimo viene definido por un conjunto de soluciones no dominadas que definen la frontera de Pareto. Esta información debe ser analizada en base a las decisiones estratégicas tomadas de modo que exista una retroalimentación en la herramienta.

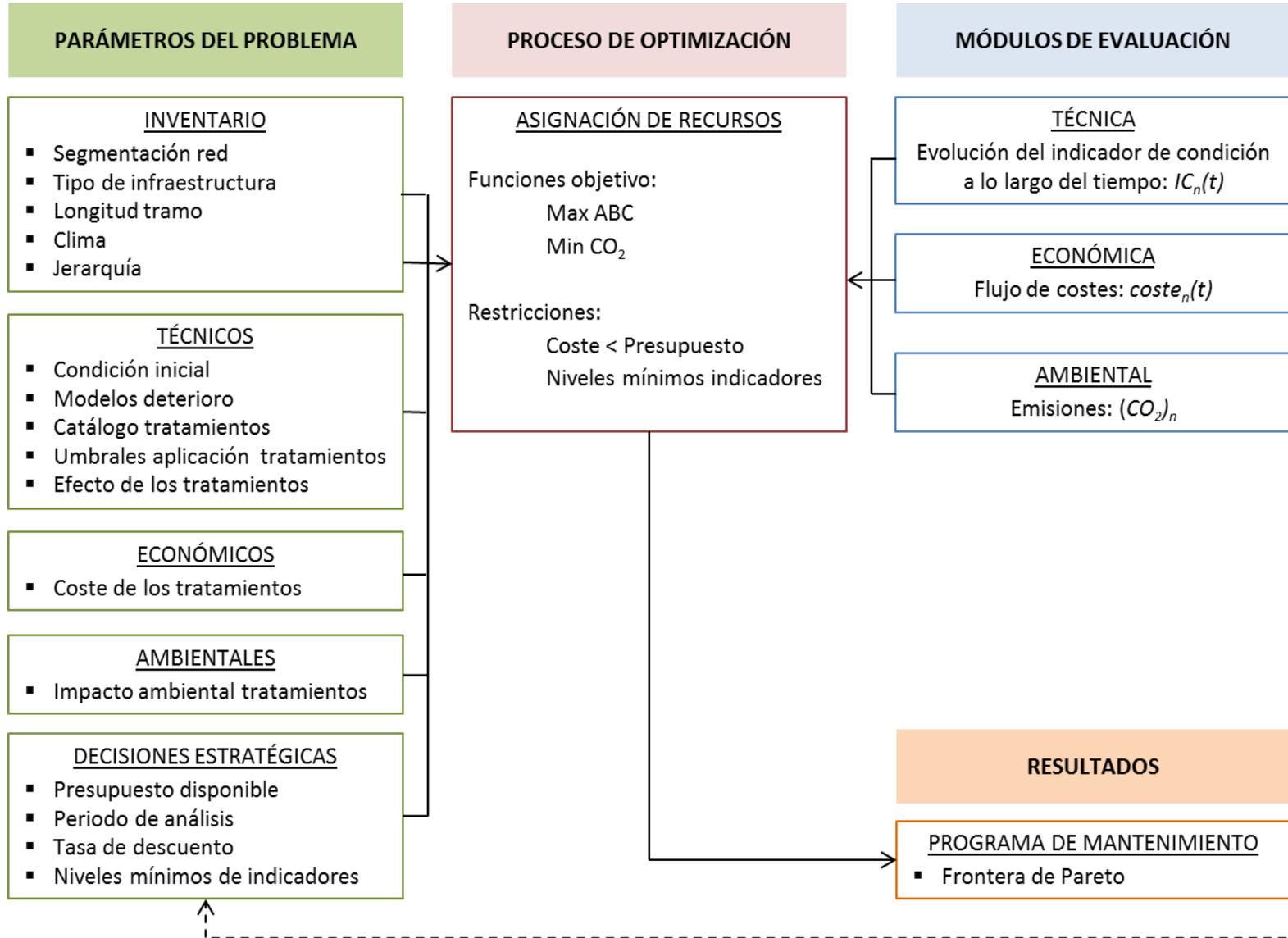


Figura 3-1: Marco conceptual de la herramienta de optimización

3.3 Consideraciones para la Aplicación de Algoritmos Heurísticos

En esta sección se presentan una serie de consideraciones para la aplicación de algoritmos de optimización heurística para resolver el problema de asignación de recursos de conservación.

3.3.1 Concepto de movimiento en los algoritmos heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entornos

Los métodos heurísticos basados en búsquedas secuenciales por entorno parten de una solución inicial, a partir de la cual, comienza un proceso iterativo de búsqueda de soluciones mejores. En cada iteración, la solución se modifica ligeramente generando así una nueva solución. Las modificaciones que transforman una solución en otra se denominan habitualmente movimiento, ya que se produce un cambio de posición dentro del espacio de soluciones. Es importante recalcar que estos movimientos tienen que ser pequeños, es decir, deben variar ligeramente el valor de la función objetivo para que la búsqueda efectuada por los algoritmos heurísticos sea efectiva. A modo aclaratorio, la Figura 3-2 muestra un ejemplo de aplicación de un movimiento de tres variables en un programa de conservación en el que los tratamientos están representados con un código numérico.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Infra 1	0	1	0	0	4
Infra 2	0	2	0	2	0
Infra 3	3	0	0	1	0



	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Infra 1	0	2	0	0	4
Infra 2	0	2	0	2	0
Infra 3	3	1	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-2: Ejemplo de un movimiento de tres variables

3.3.2 Transformación de un problema condicionado a uno no condicionado mediante el uso de funciones de penalización

En aquellos problemas de optimización en los que resulta computacionalmente muy costoso encontrar, de forma aleatoria, una solución factible (entendiendo como tal una solución que cumple las restricciones del problema) puede resultar conveniente transformar el problema condicionado a uno no condicionado. Este mecanismo, que se aplica únicamente a efectos de resolución del algoritmo de optimización, transforma el problema inicial con restricciones en uno sin restricciones que incluye una penalización en la función objetivo. En el trabajo de Yepes y Medina (2006) se muestra un ejemplo de aplicación de funciones de penalización.

A partir de una serie de evaluaciones numéricas basadas en el caso de estudio presentado en el capítulo 4, se ha observado que el problema de asignación de recursos de conservación suele presentar unas restricciones técnicas y económicas que limitan considerablemente el espacio de soluciones factibles. Ante esta situación, resulta computacionalmente costoso encontrar, de forma aleatoria, una solución factible del problema.

Es por esto que, en aquellos algoritmos heurísticos que parten de una solución inicial aleatoria (gradiente, aceptación por umbrales y recocido simulado) se ha considerado una función de penalización que transforma el problema condicionado en uno no condicionado. En estas heurísticas, el problema no condicionado considera la función objetivo definida en la (Ecuación (3.8)), la cual incluye dos funciones de

penalización asociadas a las restricciones técnicas ($PF_{tec,n}$) y económicas del problema ($PF_{eco,t}$).

$$\max f_1(\mathbf{x}) = \max \sum_{n=1}^N ABC_n - \sum_{n=1}^N PF_{tec,n} - \sum_{t=0}^T PF_{eco,t} \quad (3.8)$$

Donde, ABC_n es la efectividad del activo n de la red; y $PF_{tec,n}$ y $PF_{eco,t}$ son las funciones de penalización para las restricciones técnicas y económicas, respectivamente.

Las funciones de penalización, definidas en las Ecuaciones (3.9) y (3.10), consideran una penalización nula cuando se cumple la restricción (condición superior o igual a la mínima exigida o coste anual inferior o igual al presupuesto disponible). Sin embargo, en el momento en el que se incumple la restricción (técnica o económica), la penalización aumenta puntualmente (en $k_{1técnica}$ o k_{1eco} unidades, en función de cuál ha sido la restricción incumplida). A medida que aumenta el incumplimiento de la restricción (alejándose la condición del mínimo exigido o el coste del presupuesto disponible) la penalización aumenta de forma lineal.

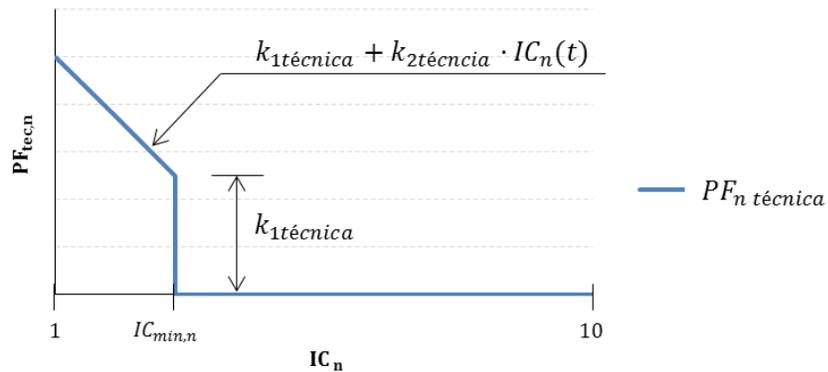
$$PF_{tec,n} = \begin{cases} 0, & IC_n(t) \geq IC_{min,n} \\ \sum_{t=0}^T k_{1tec} + k_{2tec} \cdot IC_n(t), & IC_n(t) < IC_{min,n} \end{cases} \quad (3.9)$$

Donde, $IC_n(t)$ es la condición del activo n en el año t ; $IC_{min,n}$ es la condición mínima exigida para el activo n ; k_{1tec} es una penalización técnica fija aplicada cuando la solución en evaluación no supera el valor de condición mínimo; k_{2tec} es un factor de penalización que controla el aumento de la penalización a medida que la solución evaluada se aleja más del valor mínimo exigido.

$$PF_{eco,t} = \begin{cases} 0 & ; \sum_{n=1}^N \text{coste}(x_{nt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \leq B(t) \\ k_{1eco} + k_{2eco} \cdot \sum_{n=1}^N \text{coste}(x_{nt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t}; \sum_{n=1}^N \text{coste}(x_{nt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} > B(t) \end{cases} \quad (3.10)$$

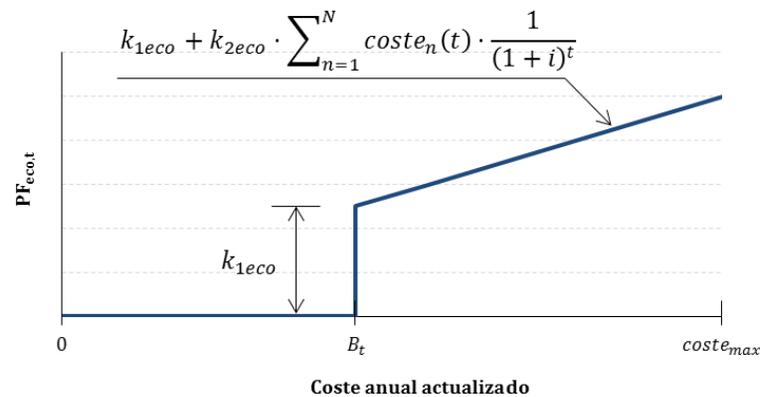
Donde, $\text{coste}(x_{nt})$ es el coste del tratamiento considerado en el programa de conservación para el tramo n en el año t ; $B(t)$ es el presupuesto disponible para el año t ; i es la tasa de descuento; k_{1eco} es una penalización económica fija aplicada cuando el coste del programa de conservación en el año t supera el presupuesto anual disponible; k_{2eco} es un factor de penalización que controla el aumento de la penalización a medida que el coste anual del programa se aleja más del presupuesto disponible.

Para facilitar la comprensión de las funciones de penalización consideradas, la Figura 3-3 y la Figura 3-4 muestran cómo varía el valor de la penalización con la condición del activo y el coste anual del programa, respectivamente. Si bien existen otras formas funcionales para la función de penalización, en este trabajo de investigación se ha optado por las formas antes descritas porque permiten un guiado de las soluciones exploradas hacia alternativas factibles, a la vez que considera una penalización puntual importante en el momento de incumplimiento.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-3: Función de penalización técnica a un activo n de la red



FUENTE: Elaboración propia

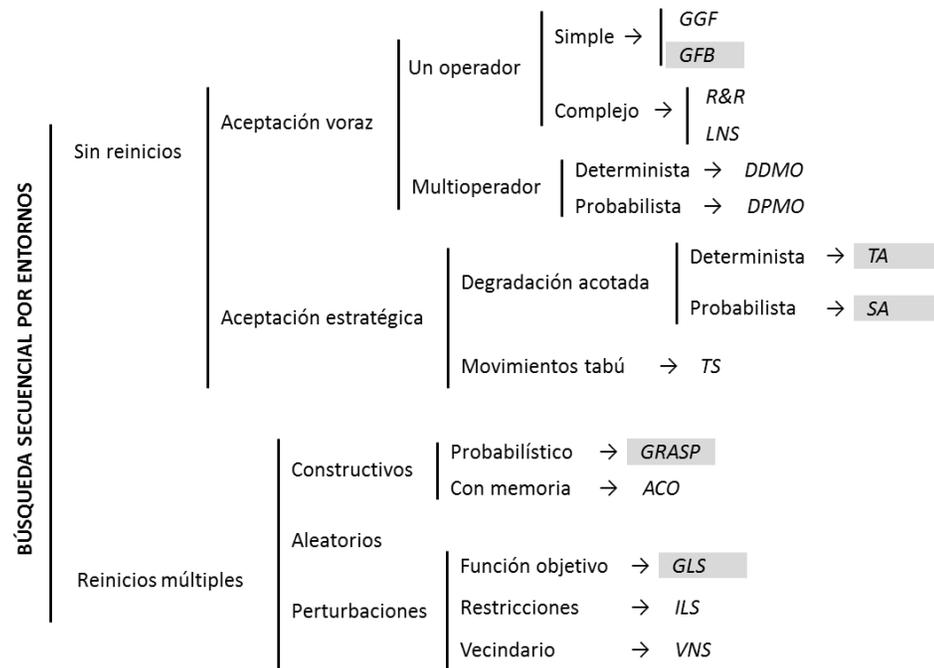
Figura 3-4: Función de penalización económica

3.3.3 Calibración de los algoritmos de optimización heurística

Los algoritmos de optimización heurística cuentan con una serie de parámetros que deben ser calibrados para su aplicación a un problema específico. Puesto que las heurísticas son métodos de optimización aproximada, la calibración busca la mejor solución de compromiso entre el número de iteraciones (o tiempo de ejecución) y el valor de la(s) función(es) objetivo obtenido en la solución óptima.

3.4 Características de los Algoritmos de Optimización Heurística

Una vez detectada la oportunidad de aplicación de métodos heurísticos para resolver el problema de asignación de recursos, en esta sección se presentan los fundamentos de algunos de estos algoritmos. Como complemento a lo expuesto en esta sección se propone consultar el trabajo de R. Martí (2003), en el que se presentan distintos métodos heurísticos y el de Liao et al. (2011), donde se revisan aplicaciones de algoritmos heurísticos en la construcción y gestión de proyectos.



FUENTE: Yepes (2002)

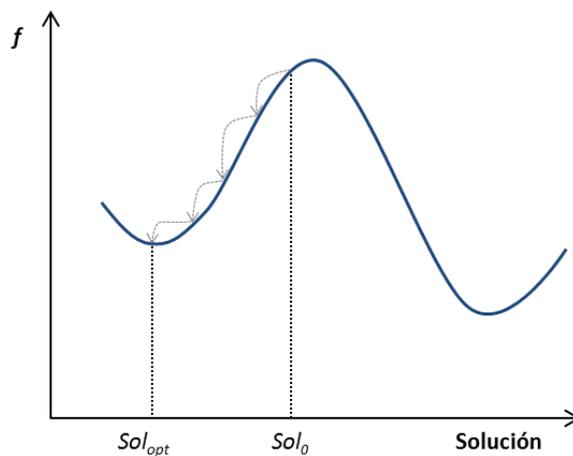
Figura 3-5: Clasificación de algoritmos de optimización heurística

De acuerdo con la clasificación propuesta por Yepes (2002) (Figura 3-5), en este trabajo de investigación se exploran algoritmos con aceptación voraz (*Greedy First Best*, GFB) y estratégica de soluciones (Aceptación por Umbrales, TA y Recocido Simulado, SA); así como métodos constructivos (GRASP) y con perturbaciones (Búsqueda Local Guiada, GLS). Estos algoritmos han sido seleccionados para analizar heurísticas de distinta naturaleza. Es importante señalar que la clasificación propuesta en la Figura 3-5 pretende mostrar la distinta naturaleza de las heurísticas empleadas, no teniendo como objetivo recoger una clasificación exhaustiva de los métodos existentes a la fecha.

En esta sección se describen las características de los algoritmos heurísticos considerados en este trabajo así como los parámetros a calibrar en cada uno de ellos y las consideraciones tomadas en su aplicación en el presente trabajo de investigación.

3.4.1 Gradiente

El algoritmo del gradiente establece una búsqueda local sin reinicio de soluciones. Este método explora el espacio de soluciones en un entorno cercano a la solución inicial aceptando aquellas soluciones que mejoren la solución de partida. En el caso de buscar soluciones que minimicen una función objetivo, este proceso puede asimilarse a realizar un recorrido por el espacio de soluciones en trayectorias descendentes, es decir, de gradiente negativo (como ilustra la Figura 3-6). Es por esto que esta técnica recibe el nombre de aceptación voraz o gradiente.

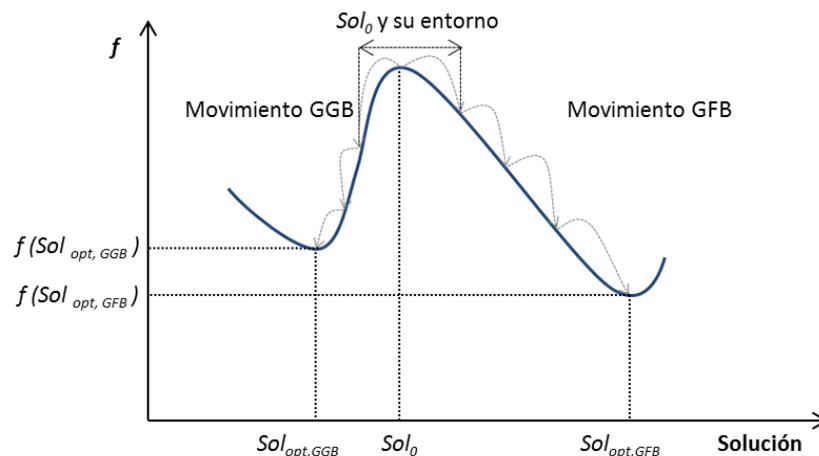


FUENTE: Adaptado de Yepes (2002)

Figura 3-6: Recorrido en una búsqueda por gradiente que minimiza f

Existen dos variantes del método del gradiente que difieren en el criterio elegido para elegir una nueva solución: el gradiente de primer descenso (GFB, *Greedy First Best*), que utiliza un criterio de descenso aleatorio que permite elegir cualquier solución que mejora la solución inicial dentro del entorno de evaluación; o el gradiente de mayor descenso (GGB, *Greedy Global Best*) que explora de forma exhaustiva el entorno de la solución inicial de forma que la nueva solución sea la que mayor mejora produce.

Anteriores investigaciones (Laguna et al. 1994) muestran que el criterio GGB no siempre conduce a las mejores soluciones finales, pues el método puede quedar atrapado en un mínimo local (Figura 3-7). Si a esto se añade el alto esfuerzo computacional que necesita el GGB para explorar exhaustivamente el entorno de la solución inicial, parece más conveniente operar con una heurística GFB.

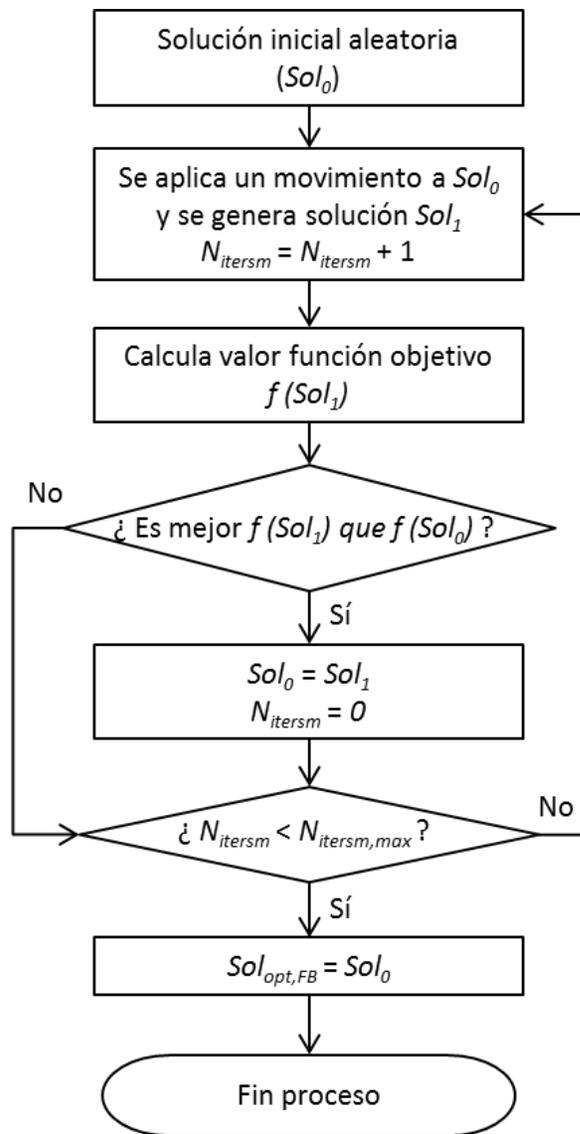


FUENTE: Adaptado de Yepes (2002)

Figura 3-7: Resultados obtenidos con criterio de primer o mayor descenso

El diagrama de flujo de la heurística GFB se describe en la Figura 3-8. El método requiere de una solución de partida Sol_0 que se obtiene, normalmente, de forma

aleatoria. A partir de esta solución se aplican movimientos a los valores de las variables para obtener una nueva solución Sol_1 . Esta solución es evaluada y, si mejora el valor de la función objetivo, se adopta como nueva solución de partida. El proceso es repetido hasta que no se produce ninguna mejora de la solución en un número de iteraciones fijado de antemano ($N_{itersm,max}$).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-8: Diagrama de flujo de la heurística GFB

La calibración de esta heurística requiere definir:

- Intervalos de variación de cada una de las variables: En este trabajo, cada variable define un tratamiento de conservación. Por lo tanto, el intervalo de variación es discreto y corresponde con los tratamientos disponibles para un determinado activo. Para definir el intervalo de variación, los tratamientos disponibles se clasificaron en orden creciente de coste. De esta forma, cada movimiento consiste en elegir alguno de los dos tratamientos adyacentes al vigente antes del movimiento (es decir, el inmediatamente más barato o más caro respecto al seleccionado inicialmente).
- Número de variables que se modifican en cada movimiento (X): En esta calibración se consideraron movimientos libres (HX) y coaccionados (FX). Los movimientos libres (HX) consistieron en variar aleatoriamente un total de hasta X variables. Es decir, en el movimiento H4, podían cambiar aleatoriamente de valor hasta 4 variables, pero podrían ser menos de 4. Por su parte, los movimientos condicionados (FX) consistieron en variar aleatoriamente un número fijo de X variables; así por ejemplo, en el movimiento F3 se variaban aleatoriamente 3 variables. Para cada uno de estos movimientos se estudiaron cinco niveles de modificación de las m variables del problema: 50%, 20%, 10%, 5% y 1%.
- VARIABLES A MODIFICAR EN CADA MOVIMIENTO: En este trabajo las variables a modificar se eligieron de forma aleatoria.
- Criterio de parada: En este trabajo se consideró el número de iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$) como criterio de parada. Se analizaron cuatro niveles de este factor: 250, 500, 1.000, 5.000 y 10.000.

Bajo estas consideraciones, el factorial para la calibración de la heurística GFB queda definido por la Figura 3-9.

Movimiento tipo F						
Movimiento tipo H	Número de variables					
	50% m	20% m	10% m	5% m	1% m	
N _{iter,sm,max}	250	N _{iter, f₁(X_{opt}),...,f_n(X_{opt})}				
	500	N _{iter, f₁(X_{opt}),...,f_n(X_{opt})}				
	1.000	N _{iter, f₁(X_{opt}),...,f_n(X_{opt})}				
	5.000	N _{iter, f₁(X_{opt}),...,f_n(X_{opt})}				
	10.000	N _{iter, f₁(X_{opt}),...,f_n(X_{opt})}				

FUENTE: Elaboración propia

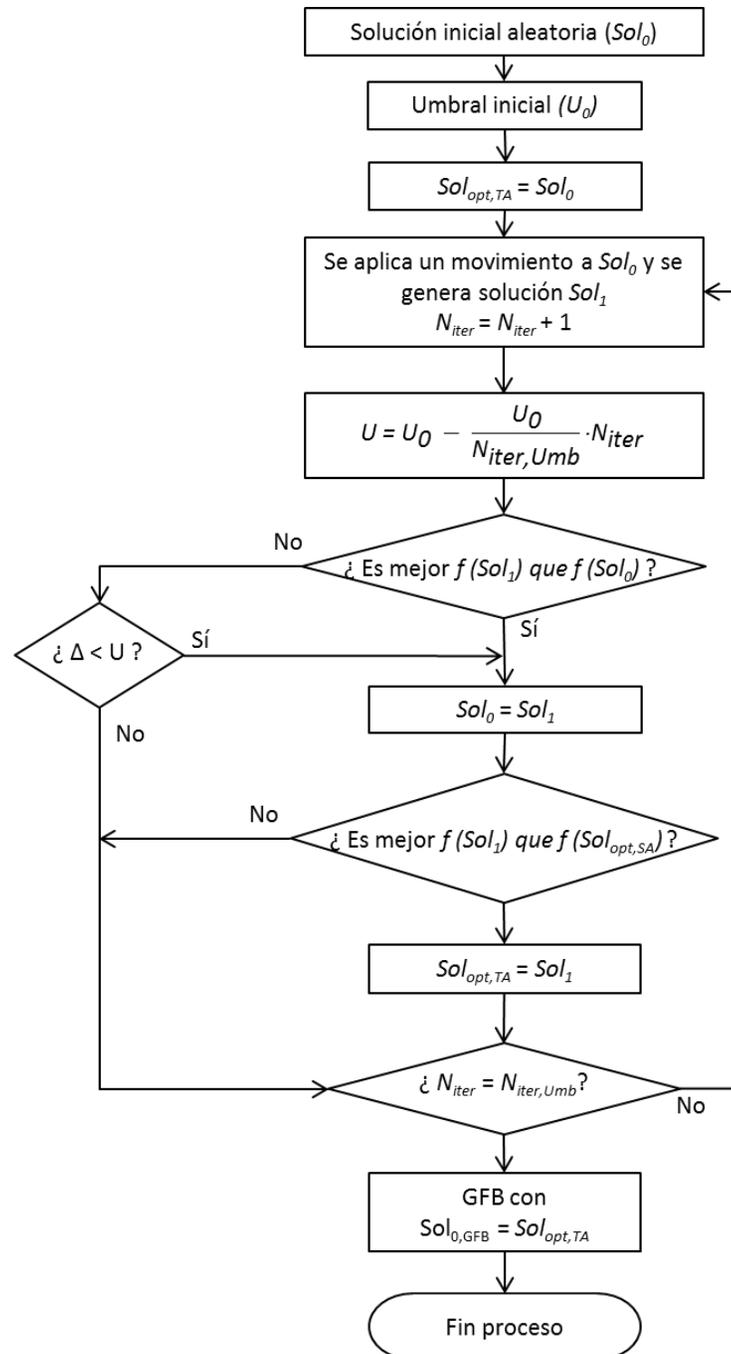
Figura 3-9: Factorial para calibración de la heurística GFB

3.4.2 Aceptación por umbrales

Una de las principales limitaciones del método del gradiente es que corren el riesgo de quedar atrapados en óptimos locales. Para evitar este problema, han surgido métodos como la aceptación por umbrales (TA) o el de recocido simulado (SA), que admiten una degradación acotada de la solución actual. La diferencia entre el TA y el SA deriva en la determinación del umbral en el que se aceptan soluciones peores. En el caso del TA, este umbral es de tipo determinista y en el SA, probabilista.

El diagrama de flujo de la heurística TA, propuesta por Dueck y Scheuer (1990), se describe en la Figura 3-10. El método parte de una solución de inicial *Solo* que se obtiene de forma aleatoria y de un umbral U que determina el criterio inicial de aceptación de peores soluciones. A partir de esta solución se aplican movimientos a los valores de las variables para obtener una nueva solución *Sol₁*. Esta solución es evaluada y, si mejora el valor de la función objetivo, se adopta como nueva solución de partida. En caso contrario, *Sol₁* reemplaza a *Solo* si el empeoramiento de la solución es menor al umbral de aceptación. El umbral de aceptación se reduce gradualmente a medida que se aplican nuevos movimientos a la solución de partida.

Una vez se ha alcanzado un valor nulo de umbral de aceptación, se lleva a cabo una búsqueda por el método del GFB. Tras un número determinado de iteraciones sin mejora de la solución, se detiene el algoritmo.

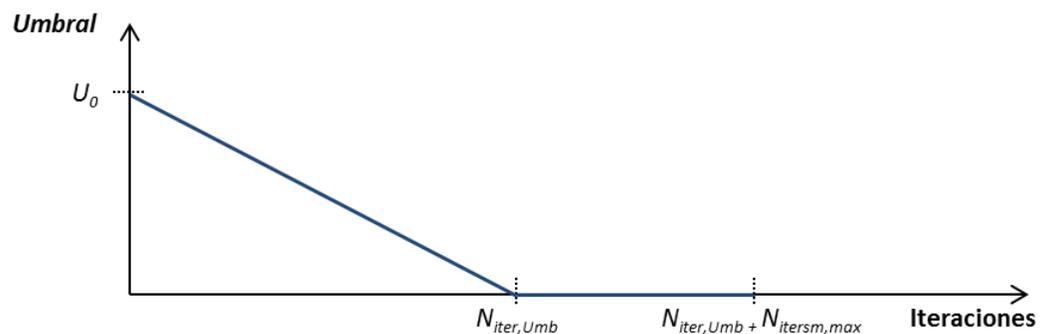


FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-10: Diagrama de flujo de la heurística TA

La calibración de la heurística TA requiere determinar:

- Características del movimiento: El movimiento utilizado en el TA se determinó a partir del movimiento realizado con la mejor solución obtenida en la calibración de la heurística GFB.
- Umbral de aceptación inicial (U_0): Este factor determina el intervalo en el que se van a aceptar soluciones menos óptimas de la función objetivo. En este trabajo de investigación, el umbral de aceptación inicial se determinó empleando el método de Yepes (2002), quien extendió el propuesto por Medina (2001) para SA a la heurística TA. Este método, descrito en detalle en la sección 3.4.3, considera un umbral de aceptación inicial que garantiza una aceptación de peores soluciones de entre el 20 y el 40% respecto al total de soluciones evaluadas.
- Criterio de reducción del umbral de aceptación: En este trabajo se ha considerado una reducción lineal del umbral de aceptación con el número de iteraciones (Figura 3-11). Para calibrar el número de iteraciones con reducción lineal del umbral ($N_{iter,Umb}$), se ensayaron valores proporcionales al número de iteraciones totales de la mejor solución obtenida con el método GFB ($N_{iter,GFB}$). Una vez el umbral de aceptación alcanza un valor nulo, se lleva a cabo una mejora con GFB. El criterio de parada en el GFB viene definido a partir del número de iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$) obtenido en la calibración del GFB.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-11: Criterio de reducción del umbral de aceptación

Bajo estas consideraciones, el factorial para la calibración de la heurística de aceptación por umbrales queda definido por la Figura 3-9.

$N_{iter,Umb}$		
$2 \cdot N_{iter,GFB}$	$3 \cdot N_{iter,GFB}$	$4 \cdot N_{iter,GFB}$
$N_{iter, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})}$	$N_{iter, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})}$	$N_{iter, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})}$

FUENTE: Elaboración propia

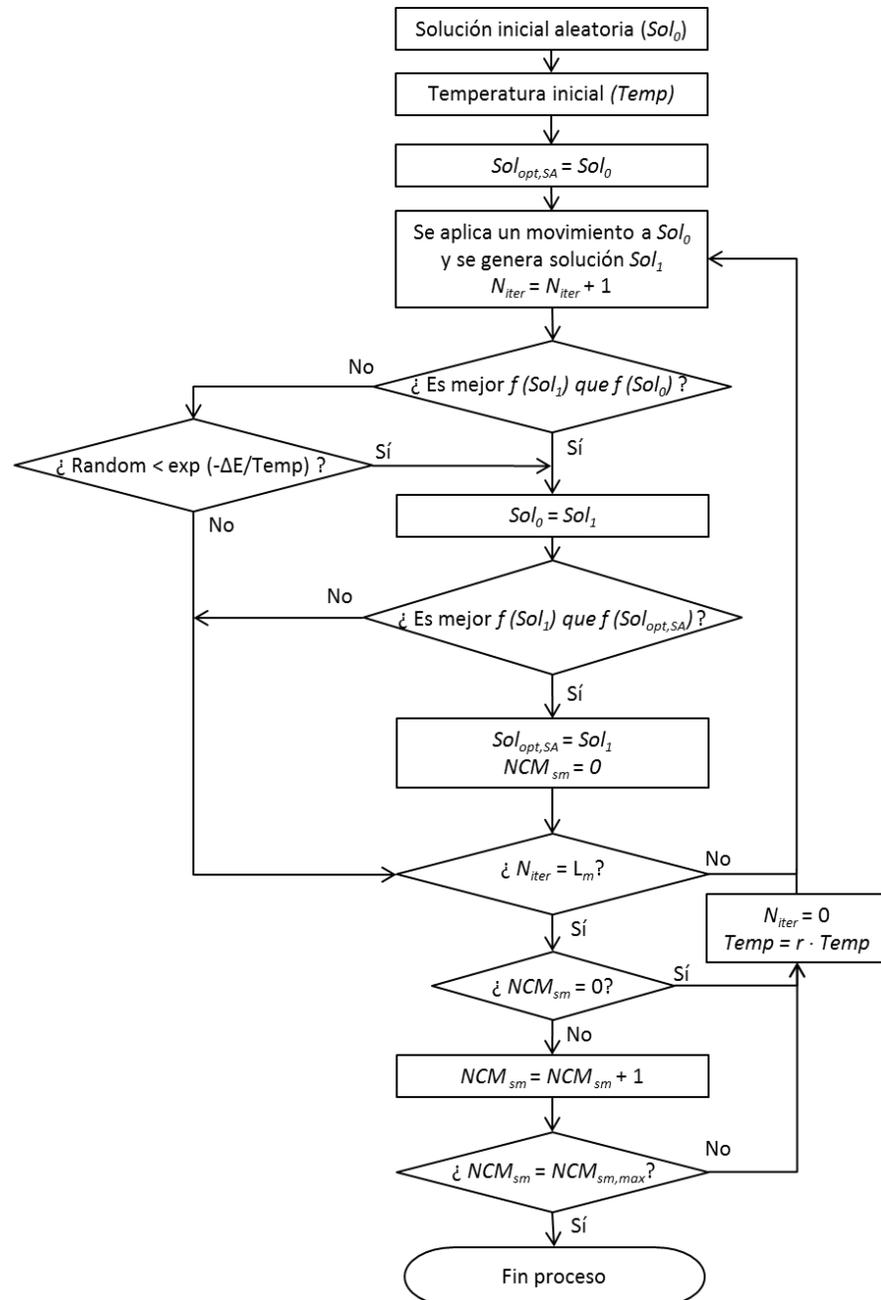
Figura 3-12: Factorial para calibración de la Aceptación por Umbrales

3.4.3 Recocido simulado

La heurística SA fue propuesta por Kirpatrick et al. (1983) y Černý (1985) en base a los trabajos sobre mecánica estadística de Metrópolis et al. (1953). Esta heurística establece una analogía entre la energía de un proceso termodinámico y la función objetivo f de un problema de optimización. En el proceso termodinámico, el sólido se reblandece calentándolo a una temperatura elevada. Luego se enfría lentamente hasta que las partículas se colocan por sí mismas en el estado de mínima energía (también llamado estado fundamental). Para cada temperatura del proceso, el sólido puede alcanzar el equilibrio térmico si el enfriamiento se produce muy lentamente.

En base a esta analogía, el SA es un algoritmo que selecciona candidatos de forma aleatoria, admitiendo soluciones peores con una determinada probabilidad función de un parámetro de ruido (llamado temperatura) y de la diferencia entre la valoración de las funciones objetivo. De esta forma, el SA empieza con una temperatura inicial alta, asociada con una probabilidad alta de aceptación de un movimiento de no mejora. En cada conjunto de iteraciones (cadena de Markov) se va reduciendo la temperatura y, por tanto, las probabilidades de aceptar una solución son cada vez más pequeñas

conforme avanza el procedimiento (Figura 3-13). Lundy y Mees (1986) demostraron que el algoritmo converge estadísticamente a la solución óptima con independencia de la solución inicial, aunque puede precisar para ello un tiempo infinito.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-13: Diagrama de flujo de la heurística SA

El algoritmo requiere de una solución de partida (Sol_0), que se obtiene de forma aleatoria, y de una temperatura inicial ($Temp$), que determina el criterio de aceptación de peores soluciones. A partir de esta solución, se aplican movimientos a los valores de las variables para obtener una nueva solución (Sol_1). Esta solución es evaluada y, si mejora el valor de la función objetivo, se adopta como nueva solución de partida. En caso contrario, Sol_1 reemplaza a Sol_0 con una probabilidad que viene dada por el factor de Boltzmann (3.11):

$$p = \frac{1}{e^{\Delta/Temp}}, \text{ si } \Delta > 0 \quad (3.11)$$

Con

$$\Delta = |f(Sol_1) - f(Sol_0)| \quad (3.12)$$

Donde, $f(Sol_1)$ y $f(Sol_0)$ es el valor de la función objetivo obtenida al evaluar las soluciones 1 y 0, respectivamente; y $Temp$ es la temperatura que controla la aceptación de soluciones en la heurística SA.

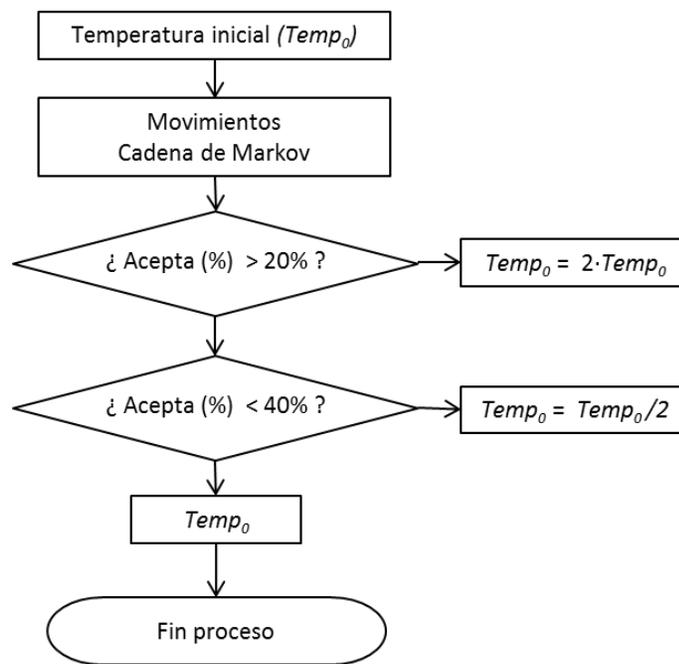
La probabilidad expresada en (3.11) se compara con un número aleatorio generado en el intervalo (0,1) con una distribución uniforme de probabilidad. Si el número aleatorio es inferior al valor de la probabilidad de aceptación obtenido con la Ecuación (3.11), la nueva solución Sol_1 es aceptada como nueva solución de partida.

Transcurrido un número predefinido de iteraciones llamado Cadena de Markov (L_m), se reduce la temperatura ($Temp$). De esta forma, a medida que avanza el problema, la temperatura se va reduciendo y, por tanto, la probabilidad de aceptación de

soluciones de peor calidad también disminuye. El algoritmo se detiene cuando se ha superado un determinado número de cadenas ($NCM_{sm\ max}$) sin mejora de la solución.

La calibración del SA requiere determinar:

- Características del movimiento: El movimiento utilizado se determinó a partir del movimiento realizado con la mejor solución obtenida en la calibración de la heurística GFB.
- Longitud de la cadena de Markov (L_m): Este factor determina el número de iteraciones en las que la temperatura permanece constante. Se exploraron seis niveles de este factor: 100, 250, 500, 1.000, 5.000 y 10.000.
- Valor de la temperatura inicial ($Temp_0$): El valor de la temperatura inicial empleado en esta investigación se ha obtenido con el algoritmo propuesto por Medina (2001) siguiendo el proceso reflejado en la Figura 3-14 y resumido a continuación.



FUENTE: Medina (2001)

Figura 3-14: Diagrama de flujo para la determinación de la temperatura inicial

- Se selecciona una temperatura inicial ($Tempo$) de forma arbitraria.
- Se aplica el algoritmo para la longitud de cadena de Markov (L_m) seleccionada y se contabiliza el número de soluciones aceptadas. De esta forma se determina el porcentaje de aceptación de soluciones ($Acepta$), calculado como la proporción de soluciones aceptadas y el total de soluciones planteadas que suponen un empeoramiento de la solución inicial (Ecuación (3.13)).

$$Acepta (\%) = \frac{N^{\circ} \text{ soluciones aceptadas}}{N^{\circ} \text{ soluciones con } \Delta > 0} \quad (3.13)$$

- Si $Acepta (\%) > 40 \%$, se considera que la temperatura elegida inicialmente es demasiado elevada y se repite el proceso adoptando un nuevo valor de temperatura igual a la mitad de la temperatura considerada inicialmente.
- Si $Acepta (\%) < 20 \%$, se considera que la temperatura elegida inicialmente es demasiado baja y se repite el proceso adoptando un nuevo valor de temperatura igual al doble de la temperatura considerada inicialmente.
- Si $20 < Acepta (\%) < 40\%$, se acepta el valor de la temperatura inicial.
- Coeficiente de enfriamiento (r): Este factor determina la velocidad en la que se reduce la temperatura del problema. En esta investigación se ha adoptado una velocidad geométrica de enfriamiento (Ecuación (3.14)) siguiendo las recomendaciones de Dowsland (1993). Se analizaron tres niveles de este factor: 0.8, 0.9 y 0.99.

$$Temp = r \cdot Temp; \text{ con } r \in [0.8, 0.99] \quad (3.14)$$

- Criterio de parada: Un número máximo de cadenas de Markov sin mejoras de la solución optimizada ($NCM_{sm,max}$) marcan el final de la ejecución del algoritmo. Se analizaron cuatro niveles de este factor: 1, 2, 3 y 4.

Bajo estas consideraciones, el factorial para la calibración de la heurística de recocido simulado queda definido por la Figura 3-15.

NCM _{sm,max} = 1		Coeficiente de enfriamiento (r)			NCM _{sm,max} = 2			NCM _{sm,max} = 3			NCM _{sm,max} = 4		
		0,8			0,9			0,99					
		100	250	500	1.000	5.000	10.000						
J _E	100	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})							
	250	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})							
	500	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})							
	1.000	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})							
	5.000	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})							
	10.000	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})	N _{iter} , f ₁ (X _{opt}),...,f _n (X _{opt})							

FUENTE: Elaboración propia

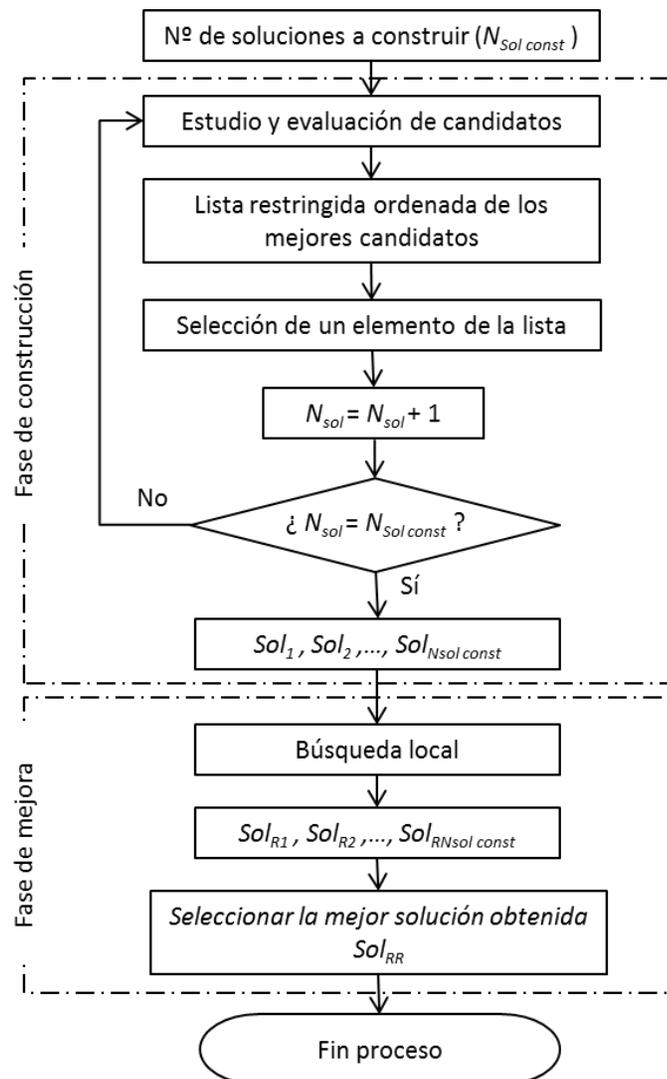
Figura 3-15: Factorial para calibración del SA

3.4.4 GRASP

El método GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) fue diseñado por Feo y Resende (1989) para estudiar un problema de alta complejidad combinatoria cuya traducción literal sería la de “procedimientos de búsqueda ávidos, aleatorizados y adaptativos”. Desde su creación, el método ha sido adaptado y aplicado en distintas áreas de optimización (Laguna y Martí 1999; Duarte et al. 2014; Sevaux et al. 2014).

El GRASP, perteneciente a la familia de métodos constructivos con reinicios múltiples (Figura 3-5), se caracteriza por dirigir la mayor parte de su esfuerzo en construir soluciones de alta calidad que son mejoradas en una etapa posterior. De esta

forma, el método GRASP, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 3-16 se desarrolla en dos fases: una de construcción de soluciones y otra posterior de mejora.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-16: Diagrama de flujo de la heurística GRASP

La fase de construcción consiste en una búsqueda secuencial de soluciones viables. En cada iteración de este proceso se estudian todos los posibles movimientos, ordenándolos en base a una función voraz y adaptativa. Esta función voraz mide el beneficio de añadir cada una de las posibles soluciones según la función objetivo. Se

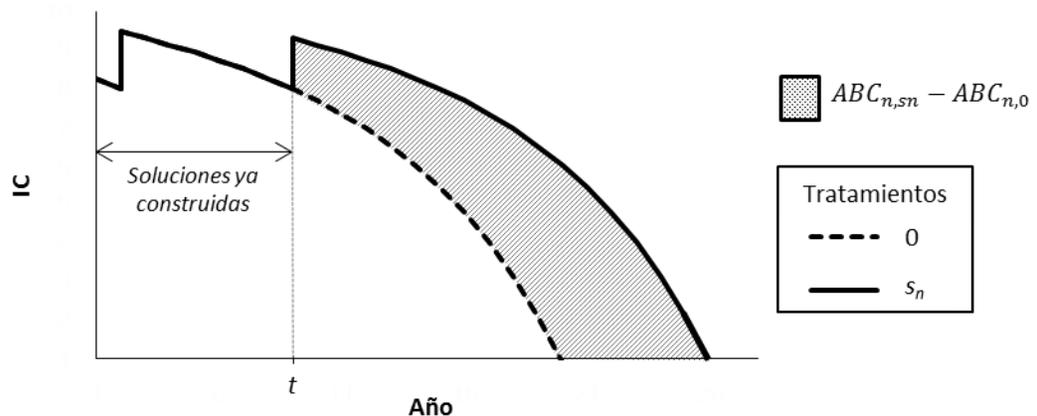
dice que la función es adaptativa porque, en cada iteración, se actualizan los beneficios obtenidos al añadir el candidato seleccionado a la solución en construcción. De esta lista ordenada de candidatos, se selecciona aleatoriamente uno de ellos. Esta selección aleatorizada permite combinar la calidad y la variabilidad de las configuraciones obtenidas en la fase de construcción. La segunda fase mejora la solución construida a través de una búsqueda local. En este proceso se suele utilizar una búsqueda simple con el fin de no emplear mucho tiempo en esta mejora. La aplicación del método GRASP requiere, por tanto, calibrar los criterios para la construcción y mejora de soluciones.

En la aplicación multiobjetivo del algoritmo GRASP, se distinguen dos tipos de métodos para la construcción y mejora con búsqueda local (Martí et al. 2015). Por una parte, están los métodos puros y, por otra, los combinados. Los métodos de construcción y mejora puros consideran una única función objetivo en el proceso, la cual puede ser elegida de forma aleatoria (métodos puros-aleatorios) o de forma ordenada (métodos puros-ordenados). Por su parte, los métodos de construcción y mejora combinados consideran más de un objetivo, que puede ser elegido de forma secuencial entre los objetivos del problema (métodos secuenciales combinados) o a través de la suma ponderada de los objetivos del problema (métodos ponderados combinados) (Martí et al. 2015). Tal y como se detallará a continuación, en este trabajo de investigación se ha empleado el método ponderado combinado tanto para la etapa de construcción como de mejora con búsqueda local. Este es el enfoque más popular en la aplicación multiobjetivo con GRASP (Martí et al. 2015).

En este estudio, las soluciones se construyen en un proceso iterativo para cada uno de los años del periodo de análisis. Así, en cada año t (con $t \leq T$; siendo T el periodo de análisis), el algoritmo evalúa el efecto de aplicar todos los posibles tratamientos (s_n , con $s_n \leq S_n$; siendo S_n el número de posibles tratamientos para el tramo n) a cada tramo de la red (n , con $n \leq N$; siendo N el número de tramos en la red). En esta evaluación se cuantifican los beneficios técnicos y ambientales derivados de la aplicación de ese tratamiento en base a una función voraz (*greedy function*). En este estudio se ha considerado la función voraz presentada en la Ecuación (3.15), la cual considera el incremento de efectividad derivado de aplicar el tratamiento s_n (ABC_{n,s_n}) respecto a la alternativa de no hacer nada ($ABC_{n,0}$). La representación gráfica de este valor es la recogida en la Figura 3-17.

$$GF_{n,s_n} = ABC_{n,s_n} - ABC_{n,0} \quad (3.15)$$

Donde, $ABC_{n,s_n} - ABC_{n,0}$ es el incremento de efectividad medida como el área bajo la curva de comportamiento (ABC) derivado de aplicar el tratamiento s_n sobre el tramo en evaluación n respecto a la alternativa de no aplicar ningún tratamiento.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-17: Efecto de aplicar el tratamiento s_n en el año t evaluado con GRASP

Una vez evaluados todos los posibles tratamientos (s_n) para todos los tramos (n) de la red, se establece una lista ordenada de estos candidatos en base al valor obtenido de la función voraz (GF_{n,s_n}). Este listado ordenado garantiza que los tratamientos más efectivos tienen mayores probabilidades de ser seleccionados para formar parte de la solución del problema.

En cada iteración se elige el tratamiento a incluir en el programa de conservación en base a esta lista ordenada, siempre y cuando, la inclusión de este tratamiento no incumpla la restricción presupuestaria. Para elegir el candidato a incluir en el programa de conservación, se ha considerado la formulación empleada por Yepes y Medina (2006) (Ecuación (3.16)). Esta formulación permite estudiar distintas funciones de probabilidad para la selección de candidatos en la lista restringida según el valor del parámetro η . Así, partiendo de una progresión geométrica de razón η , cuya suma de sus k primeros elementos sea la unidad, el término m -ésimo proporciona una esperanza de ser designado dependiente de η y que favorece a los sujetos que ocupan las posiciones iniciales. Quedan previstos los casos extremos comprendidos entre la elección determinista del primer candidato de la lista ($\eta = 0$), hasta la selección equiprobable de todos los candidatos ($\eta = 1$) (Yepes 2002).

$$p(m, k) = \eta^{m-1} \cdot \frac{1 - \eta}{1 - \eta^k} \quad (3.16)$$

Donde, $p(m, k)$ es la probabilidad de seleccionar la alternativa m de una lista ordenada de k candidatos; y η es el parámetro probabilístico que controla la función de probabilidad.

El uso de una función de probabilidad para la elección de candidatos se basa en observaciones empíricas (analizadas también en el capítulo 4 de esta tesis) que denotan que la distribución de la muestra, obtenida con una selección aleatorizada de candidatos, presenta un valor promedio de la función objetivo inferior al obtenido con un procedimiento determinista. Sin embargo, la mejor de las soluciones encontradas de forma aleatorizada tiene una alta probabilidad de superar a la del procedimiento determinista.

La repetición, para todos los años del periodo de análisis, del proceso descrito anteriormente, permite construir un programa de conservación (PC_{GRASP}) cuyo coste no supera, en ningún año, el presupuesto disponible para la conservación de la red. En la segunda fase del proceso, la solución es mejorada con una búsqueda local.

La calibración de la heurística GRASP requiere, por tanto, determinar:

- El parámetro probabilístico (η): Este parámetro controla la función de probabilidad para la selección de candidatos de la lista ordenada. Se analizaron cuatro niveles de este parámetro: 0,00; 0,10; 0,25 y 0,50.
- Los parámetros de la búsqueda local empleada en la fase de mejora: En este trabajo de investigación se explora la aplicación de la heurística GFB, ya que permite explorar el entorno cercano a la solución construida sin provocar grandes cambios en la misma. Puesto que en esta búsqueda local el GFB parte de soluciones construidas mejores que las obtenidas de forma aleatoria, se consideró una búsqueda más intensiva que la propuesta para la calibración del algoritmo GFB. Se analizó, por tanto, un movimiento tipo H con modificación de hasta el 1, 5 y 10% de las variables y cuatro niveles de iteraciones sin mejora como criterio de parada ($N_{iter,sm max}$).

En base a estas consideraciones, el diseño experimental propuesto para calibrar el algoritmo heurístico GRASP con GFB viene definido en la Figura 3-18.

Parámetro probabilístico		Número de variables		
		10% m	5% m	1% m
$N_{iters,m,max}$	$\eta = 0$			
	100	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$
	250	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$
	500	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$
	1.000	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$	$N_{iter}, f_1(x_{opt}), \dots, f_n(x_{opt})$

FUENTE: Elaboración propia

Figura 3-18: Factorial de calibración del parámetro probabilístico en GRASP

3.4.5 Búsqueda local guiada

La búsqueda local guiada (*Guided Local Search*, GLS) es un método propuesto por Voudouris y Tsang (1995, 1999) en la que la función objetivo es penalizada de forma dinámica durante el proceso de búsqueda. Cada vez que la búsqueda queda atrapada en un óptimo local, se modifican las penalizaciones de forma que la búsqueda se redirige a regiones más prometedoras del espacio de búsqueda.

La GLS utiliza determinadas características de las soluciones para modificar la función objetivo. Estas características, denominadas “*solution feature*”, puede ser cualquier propiedad de la solución que satisfaga la simple restricción de no ser trivial. Esto quiere decir que no todas las soluciones pueden tener esta característica: algunas soluciones la tienen y otras no. Es por esto que, las características de las soluciones a considerar en la GLS, dependen fuertemente del problema específico de optimización

(Voudouris y Tsang 1999). Uno de los aspectos significativos de la GLS es que la búsqueda se apoya en información incorporada a lo largo del proceso de optimización.

En base a estas premisas, la GLS lleva a cabo una búsqueda local trabajando con una nueva función objetivo definida como:

$$f'(x) = f(x) + \lambda \cdot \sum_{i=1}^M p_i(x) \cdot I_i(x) \quad (3.17)$$

Donde, M es el número de características de las soluciones (*solution features*) consideradas; p_i es el parámetro de penalización correspondiente a la característica i ; λ es el parámetro de la heurística GLS que controla la importancia de la penalización respecto a la función objetivo inicial ($f(x)$); y $I_i(x)$ es una función dicotómica de caracterización de soluciones. Así, $I_i(x)$ toma valor 1 si la solución x tiene la característica i analizada y 0 en el caso contrario.

La aplicación de GLS requiere determinar la heurística utilizada para llevar a cabo la búsqueda local, la característica de las soluciones que será considerada en la función de penalización (*solution feature*) y el parámetro λ que controla la importancia de la función de penalización. Puesto que estos parámetros dependerán del problema concreto de optimización, sus valores se determinarán en base a las particularidades del caso de estudio presentado en el capítulo 4.

4 APLICACIÓN DE ALGORITMOS HEURÍSTICOS MONOBJETIVO A CASO DE ESTUDIO: LA GESTIÓN DE REDES DE PAVIMENTOS URBANOS

En este capítulo se aplica la herramienta de optimización considerando los algoritmos heurísticos presentados en el capítulo 3 a un caso de estudio que consiste en la gestión de una red de pavimentos urbanos en Chile. Esta aplicación se lleva a cabo a partir de los datos recopilados en el proyecto Fondef D09I1018 “Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile” (Videla et al. 2010). El proyecto, de aquí en adelante denominado proyecto Fondef, tiene por objetivo identificar las necesidades presentes y futuras de los pavimentos urbanos y permitir una gestión efectiva de los mismos. Este proyecto está liderado por la Pontificia Universidad Católica de Chile con la colaboración de la University of Waterloo, *Centre for Pavement and Transportation Technology* (CPATT), Canadá y está financiado por los organismos públicos Fondef-Conicyt Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU), el Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP), el Gobierno Regional y las Municipalidades de Santiago y Macul.

En este capítulo se revisan, en primer lugar, las particularidades de la gestión de pavimentos urbanos. En base a estas particularidades, se definen los parámetros del problema de optimización para aplicar la herramienta heurística al caso de estudio urbano. A continuación, se aplican los algoritmos heurísticos presentados en el capítulo 3. Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas de esta aplicación.

4.1 Particularidades de la Gestión de Pavimentos Urbanos

La herramienta de optimización objeto de este trabajo de investigación está diseñada para la gestión de distintos activos de infraestructura de transporte terrestre. Puesto que su aplicación a un caso específico requiere una serie de ajustes y calibraciones, en esta sección se revisan las particularidades de la gestión de pavimentos urbanos.

En la actualidad, existe un gran número de herramientas para la gestión de pavimentos interurbanos (Mizusawa 2009). Sin embargo, existen diferencias importantes entre los pavimentos urbanos e interurbanos, que hacen necesario el desarrollo de herramientas específicas para su gestión (Videla et al. 2010; Osorio et al. 2012b; TAC 2013):

- Base de datos: La red urbana se caracteriza por ser una red densa con gran concentración de intersecciones y múltiples alternativas de conexión entre éstas. Además, en el espacio vial urbano coexisten diversos servicios como redes de agua potable, alcantarillado, electricidad, etc. La gestión de pavimentos urbanos requiere, por lo tanto, una base de datos mayor que la requerida para el caso interurbano.
- Alternativas de conservación: Las características de la red urbana limita el número de alternativas de conservación que pueden ser consideradas. Así por ejemplo, la presencia de instalaciones bajo los viales urbanos limita la profundidad de actuación (ej. fresado), resultando inviable aplicar tratamientos de reciclado profundo. Otro ejemplo a este respecto es que, en el caso urbano, la altura disponible del bordillo limita el espesor de los recrecidos de firme que pueden aplicarse.

- Influencia del deterioro en el nivel de servicio: En pavimentos interurbanos, la regularidad superficial (evaluada habitualmente en términos de IRI) es el factor más importante a la hora de determinar un indicador general de condición del pavimento. Sin embargo, la metodología de medición de IRI resulta poco apropiada al caso urbano, caracterizado por una elevada presencia de intersecciones y menores velocidades de circulación que el caso interurbano (Reggin et al. 2008; Wang et al. 2013). El IRI parece, por tanto, un indicador poco adecuado para cuantificar el deterioro de pavimentos urbanos, en los que puede ser más significativo la presencia de deterioros puntuales originados, por ejemplo, en una arqueta o tapa de alcantarillado.
- Procedimientos de toma de datos: Los procedimientos habituales para la toma de datos pueden utilizarse tanto para pavimentos urbanos como interurbanos. Sin embargo, en el caso de pavimentos interurbanos, que presentan mayores velocidades de circulación, parece más adecuado el uso de métodos automáticos con vehículos de toma de datos. Esta consideración es también extrapolable al caso de pavimentos urbanos pertenecientes a tramos principales de la red con altas velocidades de circulación.
- Estructura de pavimentos: La red urbana presenta un tráfico con características diferentes a las existentes en el caso interurbano, lo cual incide en la estructura con la que deben diseñarse los pavimentos. Así, en el caso urbano, las velocidades de circulación son inferiores y pueden llegar a presentarse mayores volúmenes de tráfico (si bien en el caso urbano es habitual un menor porcentaje de vehículos pesados).

Teniendo en cuenta las peculiaridades de los pavimentos urbanos, se revisa a continuación de forma breve, la idoneidad de los métodos de evaluación económica y ambiental propuestos en el capítulo 2.

Para analizar el indicador económico más idóneo para su aplicación en el caso urbano, se estudiaron en detalle los costes considerados en la evaluación económica. Este análisis, que se recoge en el Anexo C, concluyó que parte de los costes a usuarios (concretamente los costes asociados a tiempos de viaje y accidentes) son poco susceptibles de variar con la condición del pavimento, existiendo otros factores más determinantes en su cuantificación (como por ejemplo, el efecto de la congestión). De hecho, únicamente se identificaron dos costes en los que la condición del pavimento resulta significativa: los costes directos de aplicación de tratamientos y los costes a usuarios por operación vehicular. El primero de estos costes está considerado en la herramienta de optimización a partir de la restricción presupuestaria. Por su parte, los costes a usuarios por operación vehicular se cuantificarán de forma indirecta en términos de efectividad.

Respecto a la evaluación ambiental y, teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones de los métodos revisados en el capítulo 2, se concluye que el modelo PaLATE es el más completo para la evaluación de alternativas de tratamientos de conservación en pavimentos urbanos en Chile. Por una parte, PaLATE permite la evaluación de diferentes operaciones de conservación tanto en pavimentos asfálticos como de hormigón; considerando, además, el uso de materiales reciclados. Estos tratamientos, no aplicados habitualmente en Chile, constituyen una tecnología que reduce sustancialmente el impacto ambiental; por lo que es esperable que adquieran importancia en un futuro próximo.

4.2 Parámetros del Problema de Optimización

En esta sección se describen los parámetros considerados en la aplicación de la herramienta de optimización al caso de estudio.

4.2.1 Parámetros de inventario

El caso de estudio corresponde con una red de pavimentos urbanos situada en la ciudad de Santiago (Chile). Santiago se caracteriza por presentar un clima templado de tipo mediterráneo, con una estación seca y precipitaciones concentradas en los meses de invierno (INE 2014). En términos medios, la precipitación anual en Santiago es de 360 mm (INE 2014), con valores mensuales que oscilan entre 20 y 200 mm (MOP y DDQ Consultants 2008; Chamorro 2012; Osorio et al. 2014a). Durante los meses de lluvia, los valores de precipitación pueden llegar a ser significativamente superiores, alcanzando valores máximos mensuales de entre 50 y 400 mm (MOP y DDQ Consultants 2008; Chamorro 2012; Osorio et al. 2014a).

La red urbana de Santiago tiene una extensión de 810 km (MINVU 2008a), y está gestionada por distintos organismos, principalmente el Gobierno Regional y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). A efectos de este trabajo de investigación, se ha analizado una porción de la red urbana de la comuna de Macul (Figura 4-1). Concretamente se analiza una red compuesta por 20 tramos, la cual presenta una longitud total aproximada de 10 km.



FUENTE: GoogleMaps

Figura 4-1: Red urbana de la comuna de Macul (Santiago)

La red analizada presenta pavimentos tanto asfálticos como de hormigón pertenecientes a distintas clases funcionales, de acuerdo a la clasificación fijada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU 2008b): expresas, troncales, colectoras, servicio, locales y pasajes. Las cuatro primeras categorías componen la red estructurante, mientras que las dos últimas (locales y pasajes) componen la red secundaria. Puesto que en el momento de redacción de este trabajo no se disponían de los datos reales de tráfico de los tramos considerados, es útil señalar que, la capacidad media por calzada de la red estructurante varía de 600 a más de 4.000 vehículos/hora, mientras que el de la red secundaria es inferior a 600 vehículos/hora (MINVU 2008b).

La Tabla 4-1 muestra los parámetros de inventario de los tramos de la red de estudio. Dentro de la red de Macul, estos tramos han sido seleccionados con el objetivo de recoger pavimentos con distintos niveles de deterioro y tipologías de estructura (asfalto y hormigón) pertenecientes tanto a la red estructurante como secundaria. En este sentido es importante señalar que, en todos los casos, se ha considerado únicamente un carril de circulación.

Tabla 4-1: Parámetros de inventario y condición inicial de la red de estudio

ID	Red	Estructura	Longitud [m]	Anchura [m]	ICPU_{ini}
1	Estructurante	Asfalto	718	3,5	5,5
2	Estructurante	Asfalto	850	3,6	5,2
3	Secundaria	Asfalto	118	4,0	6,6
4	Estructurante	Asfalto	600	3,4	6,6
5	Estructurante	Asfalto	502	3,0	8,0
6	Estructurante	Asfalto	98	3,0	7,1
7	Estructurante	Asfalto	273	3,6	8,3
8	Estructurante	Asfalto	503	3,0	9,4
9	Secundaria	Asfalto	533	3,6	10,0
10	Estructurante	Asfalto	393	3,4	9,9
11	Estructurante	Hormigón	547	3,5	7,7
12	Estructurante	Hormigón	836	3,1	7,7
13	Estructurante	Hormigón	562	3,0	9,0
14	Secundaria	Hormigón	355	3,5	8,2
15	Estructurante	Hormigón	1.190	3,0	8,1
16	Estructurante	Hormigón	366	3,5	9,5
17	Secundaria	Hormigón	175	4,0	9,3
18	Estructurante	Hormigón	336	3,5	9,1
19	Secundaria	Hormigón	170	3,0	9,3
20	Estructurante	Hormigón	511	3,3	9,2

FUENTE: Proyecto Fondef (Videla et al. 2010)

4.2.2 Parámetros técnicos

De acuerdo con el marco conceptual de la herramienta de optimización propuesto en el capítulo 3 (Figura 3-1), los parámetros técnicos deben recoger información de la condición inicial de la red, los modelos de deterioro, el catálogo de tratamientos que pueden aplicarse, sus umbrales de aplicación y el efecto de la aplicación de los mismos en la condición del pavimento. En esta sección se detallan las consideraciones tomadas a efectos de este trabajo de investigación.

a) Condición inicial

El indicador de condición utilizado en el caso de estudio es el ICPU (Índice de Condición de Pavimentos Urbanos). Este indicador, desarrollado por Osorio et al. (2014a) en el marco del proyecto Fondef (Videla et al. 2010), consiste en un indicador compuesto que evalúa en una escala 1-10 la condición del pavimento, siendo 10 la mejor condición posible. El ICPU se obtiene en base a medidas objetivas de deterioro tomadas en evaluaciones manuales o automáticas, conforme a las expresiones propuestas por Osorio et al. (2014a):

$$ICPU_{Asf} = 10 - 0,237 \cdot B - 0,059 \cdot A - 0,049 \cdot GTR - 0,038 \cdot GF - 0,046 \cdot PD \quad (4.1)$$

$$ICPU_{Hor} = 10 - 0,063 \cdot PD - 0,042 \cdot GL - 0,038 \cdot RBE - 0,025 \cdot GT - 0,263 \cdot E - 0,018 \cdot JD \quad (4.2)$$

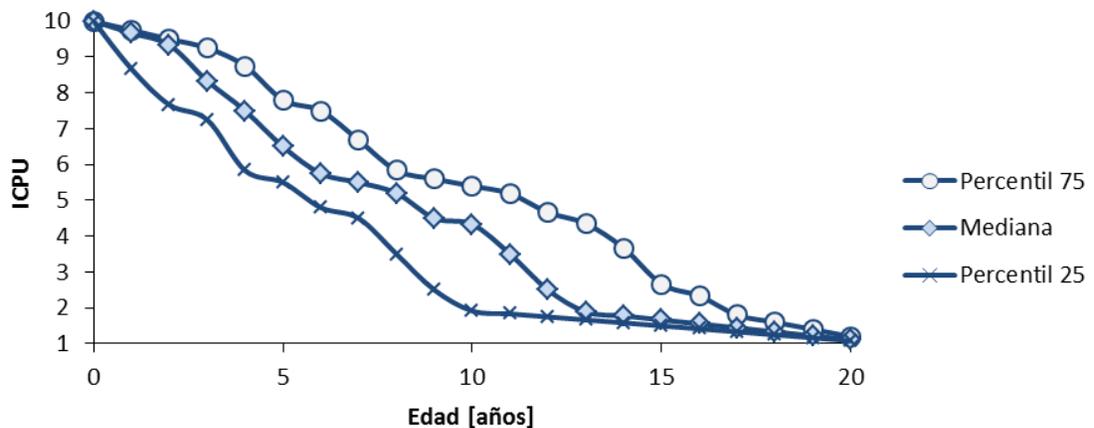
Donde,

A:	Ahuellamiento medio en los segmentos de la unidad muestral (mm)
B:	Baches (%)
E:	Escalonamiento medio de cada losa en la unidad muestra (mm)
GF:	Agrietamiento fatiga (%)
GL:	Agrietamiento longitudinal (%)
GT:	Agrietamiento transversal (%)
GTR:	Suma de agrietamiento transversal y de reflexión (%)
ICPU _{Asf} :	Índice de Condición de Pavimentos Urbanos para pavimentos asfálticos
ICPU _{Hor} :	Índice de Condición de Pavimentos Urbanos para pavimentos de hormigón
JD:	Juntas dañadas, expresado como porcentaje de juntas dañadas respecto a la longitud total de juntas existentes en la unidad muestral
PD:	Parches deteriorados (%)
RBE:	Roturas de borde o esquina (%)

En base a este indicador de condición, la condición inicial de los tramos de la red de estudio ($ICPU_{ini}$ en Tabla 4-1) se calculó a partir de evaluaciones en terreno realizadas en junio 2012 como parte del proyecto Fondef (Videla et al. 2010).

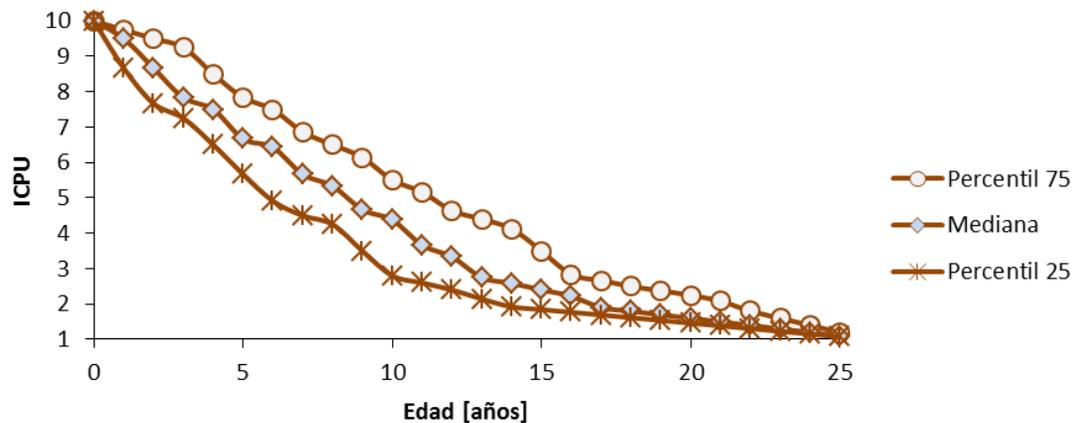
b) Modelos de deterioro

Los modelos de deterioro considerados en el caso de estudio han sido desarrollados como parte del proyecto Fondef para predecir el comportamiento de pavimentos urbanos en clima Mediterráneo (Osorio et al. 2014b, 2015). Estos modelos se han desarrollado considerando tres campañas de auscultación de la red urbana de Santiago. A partir de los datos recolectados en estas campañas, se definieron las matrices de transición de probabilidades desarrolladas mediante modelos markovianos. Estas matrices, que consideraron nueve rangos de ICPU definidos entre 1–1,99 a 9–10, fueron analizadas con un proceso de simulación de Montecarlo que consideró 20 años para pavimentos de asfalto y 25 para pavimentos de hormigón (Osorio et al. 2014b, 2015). Como resultado de estos modelos, se obtuvieron las curvas de deterioro para pavimentos de asfalto y hormigón, representadas en la Figura 4-2 y Figura 4-3, respectivamente.



FUENTE: Adaptado del proyecto Fondef (Videla et al. 2010; Osorio et al. 2014b, 2015)

Figura 4-2: Curvas de deterioro para pavimentos asfálticos



FUENTE: Adaptado del proyecto Fondef (Videla et al. 2010; Osorio et al. 2014b, 2015)

Figura 4-3: Curvas de deterioro para pavimentos de hormigón

A la vista de las curvas de deterioro desarrolladas en el marco del proyecto Fondef (Osorio et al. 2014b, 2015), se observa que los pavimentos urbanos en Chile presentan una vida en servicio de, aproximadamente, 13 años en el caso de asfaltos y 17 en el de hormigones. Estos periodos vienen definidos por el año, a partir del cual, el proceso de simulación de Montecarlo empieza a obtener valores en el último rango de condición (esto es, ICPU entre 1 y 1,99). Puesto que las matrices de transición de probabilidad consideran rangos de ICPU, es importante mencionar que se ha considerado una variación lineal de ICPU en aquellos años en los que la simulación ha obtenido el mismo rango de condición. Es por esto que, en ambas curvas de deterioro, existe un deterioro lineal dentro de cada rango de ICPU.

Con el objetivo de analizar la capacidad de análisis de la herramienta y, teniendo en cuenta que en el momento de su aplicación al caso de estudio, los modelos de deterioro no estaban completamente desarrollados y validados; se tomaron una serie de consideraciones a efectos de este trabajo de investigación.

Concretamente, a efectos de esta tesis, se consideró la variabilidad de las curvas de deterioro para analizar distintos tipos de estructura de los pavimentos analizados. Así, teniendo en cuenta la clasificación funcional presentada en la sección 4.2.1, se

distinguió entre las estructuras de los pavimentos pertenecientes a la red primaria y secundaria. La distinción entre estas estructuras se realizó considerando que los pavimentos con mayores niveles de sollicitación habrían sido diseñado con estructuras más resistentes y, en consecuencia, mayor vida útil.

En base a esta consideración, se caracterizó el deterioro de los pavimentos de la red secundaria y primaria en base a distintos percentiles de los datos reales. Específicamente, se consideraron las curvas de percentil 25 y 75 para caracterizar el deterioro de los pavimentos de la red secundaria y primaria, respectivamente. Si bien esta consideración no refleja, necesariamente, el deterioro real de los pavimentos de la red estructurante y secundaria; su consideración permite estudiar la capacidad de la herramienta propuesta para analizar distintas estructuras de pavimento a partir de la variabilidad de los datos reales recopilados. El uso de percentiles para caracterizar distintos escenarios de análisis ha sido empleado y validado en otros estudios para caracterizar, por ejemplo, distintos escenarios climáticos (Chamorro 2012; Osorio et al. 2014b, 2015). En la aplicación real de los modelos de deterioro, las curvas asociadas a las distintas estructuras de pavimento deberán validarse a partir de ensayos de capacidad estructural y de sollicitaciones de tránsito.

c) Catálogo de tratamientos

En esta sección se describen las alternativas de conservación consideradas en el caso de estudio. Estos tratamientos han sido seleccionados en base a la práctica actual en Chile, de acuerdo con entrevistas llevadas a cabo con personal técnico de administraciones y empresas encargadas de la conservación de pavimentos. Con el objetivo de ampliar el alcance del estudio e incluir tratamientos potencialmente aplicables en Chile, se amplió el número de alternativas de conservación incluyendo tratamientos aplicados en otros países tales como EEUU y España. A continuación se describen las características de los tratamientos considerados para las distintas jerarquías de la red (Tabla 4-2). Es importante señalar que los tratamientos considerados difieren en los deterioros para los cuales es efectiva su aplicación. Es

por esto que, en la sección posterior, se definen los umbrales de condición (en términos de ICPU) para los cuales es efectiva su aplicación.

Tabla 4-2: Tratamientos de conservación considerados en el caso de estudio

Tratamiento	Pavimentos de asfalto		Pavimentos de hormigón	
	Red estructurante	Red secundaria	Red estructurante	Red secundaria
Riego de neblina	✓	-	-	-
Lechada asfáltica	✓	-	-	-
Sello de agregado	✓	-	-	-
Microaglomerado en frío	✓	-	-	-
Cepillado	-	-	✓	-
Recrecido funcional	✓	✓	✓	-
Reparación de losa	-	-	✓	✓
Reciclado in situ en caliente	✓	-	-	-
Reciclado in situ en frío	✓	-	-	-
Recrecido estructural con asfalto	✓	✓	✓	✓
Recrecido estructural con hormigón	-	-	✓	✓
Reconstrucción	✓	✓	✓	✓

FUENTE: Elaboración propia

i) Riego de neblina

El sello tipo riego de neblina (también conocido como riego en negro, riego pulverizado o *fog seal*) consiste en la aplicación de una emulsión asfáltica diluida para rejuvenecer la superficie del pavimento y evitar así la pérdida de agregado en la capa asfáltica de rodadura (Hicks et al. 2000; Kraemer et al. 2004). Estos sellos se aplican cuando el pavimento presenta los primeros indicios de envejecimiento tales como agrietamiento superficial de baja severidad, pérdida leve de cemento asfáltico en la superficie o decoloración superficial del asfalto caracterizada por un cambio de tonalidad tendiente al color gris (MINVU 2008b; MOP 2014).

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de estos tratamientos en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 10.3.1.1 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

ii) Lechada asfáltica

El sello tipo lechada asfáltica (también conocido como lechada bituminosa o *slurry seal*) es una mezcla de agregado fino bien graduado, filler mineral (si es necesario), asfalto emulsionado y agua, aplicado a un pavimento como tratamiento superficial (MINVU 2008b).

Al igual que el riego neblina, las lechadas bituminosas pueden aplicarse para sellar fisuras y grietas. Sin embargo, estas últimas permiten además detener el desgaste superficial y mejorar la fricción entre pavimento y neumático (MINVU 2008b; MOP 2014).

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de la lechada asfáltica en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 10.3.1.3 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b). Dados los niveles de tráfico espesados en el caso urbano, se considera una lechada con agregado tipo II (Caltrans 2009).

La aplicación de la lechada asfáltica requiere la preparación previa de la superficie mediante el sellado de grietas y la reparación de baches. Estas actividades previas se ejecutarán de acuerdo a las especificaciones recogidas en los artículos 10.3.2.1 y 10.3.2.2 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

iii) Sello de agregado

El sello de agregado (conocido también como riegos con gravilla o *chip seal*) es un tipo de tratamiento superficial que consiste en la aplicación de un

riego de liga (constituido por una emulsión asfáltica normal o modificada) seguido de una cobertura de agregados monogranulares (MINVU 2008b).

Si las extensiones de ligante y árido tienen lugar una sola vez, se habla de tratamiento superficial simple (o también riego monocapa o *single chip seal*). Si, por el contrario, se hacen dos aplicaciones con tamaños decrecientes de agregado, se habla de tratamiento superficial doble (también conocido como riego bicapa o *double chip seal*) (Kraemer et al. 2004; Gransberg y James 2005).

Estos tratamientos se emplearon, inicialmente, como capa de rodadura en caminos no pavimentados de bajo tránsito. Sin embargo, en los últimos años, su aplicación se ha extendido a la conservación de pavimentos con alto y bajo volumen de tránsito (Gransberg y James 2005). Como tratamiento de conservación, su aplicación permite sellar la superficie del pavimento, detener el desgaste superficial y mejorar la fricción superficial (Hicks et al. 2000; Gransberg y James 2005; MINVU 2008b; MOP 2014).

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación del sello de agregados en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 5.9 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

La aplicación del sello de agregados requiere la preparación previa de la superficie mediante el sellado de grietas y la reparación de baches. Estas actividades previas se ejecutarán de acuerdo a las especificaciones recogidas en los artículos 10.3.2.1 y 10.3.2.2 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

iv) Microaglomerado en frío

Este tratamiento (conocido también como micropavimento o *microsurfacing*) posee los mismos componentes que la lechada asfáltica; si bien en el caso de los microaglomerados, la emulsión se modifica con

polímeros y los áridos utilizados son de mayor calidad mecánica. Es por esto que suele ser utilizado en vías importantes (MINVU 2008b). A modo de resumen, Gransberg (2010) identifica tres características en los microaglomerados en frío que los diferencian de las lechadas asfálticas: (1) siempre contienen polímeros; (2) la rotura de la emulsión es más rápida, permitiendo una puesta en servicio en un intervalo de tiempo menor y (3) pueden disponerse capas de mayor espesor que el tamaño máximo del árido.

El microaglomerado se aplica para tratar pavimentos asfálticos con cierto grado de envejecimiento que presentan pérdida de áridos en superficie y ahuellamiento. Permite, además, corregir pequeñas irregularidades superficiales y mejorar la fricción (Gransberg 2010).

El uso de este tratamiento aún no está muy extendido en Chile. De hecho, ha sido en la edición de 2014 cuando se ha incorporado este tratamiento en el volumen 5 del Manual de Carreteras (en el que se definen las especificaciones técnicas generales de construcción). Sin embargo, el microaglomerado en frío aún no está recogido en el volumen 7 del Manual, en el cual se abordan los aspectos de mantenimiento vial (MOP 2014). A pesar de esto, se ha decidido incluirlo como alternativa de conservación dada su exitosa aplicación en países como España, Estados Unidos y Canadá (Hicks et al. 2000; Avilés Lorenzo 2002; Chan et al. 2011).

La normativa actual en Chile distingue dos tipos de microaglomerados en frío, los cuales difieren en la granulometría de los áridos (MOP 2014). En base a las recomendaciones americanas y canadienses (Caltrans 2009; TAC 2013), que recomiendan los microaglomerados con granulometría fina para su aplicación en pavimentos urbanos, se considera el tipo B-1 en el caso de estudio (MOP 2014). Este microaglomerado es equivalente al *Type II* de la normativa americana (Gransberg 2010) y al *MICROF 5* de la normativa española (Ministerio de Fomento 2011).

Puesto que en la normativa chilena no se especifica el rango de espesores recomendados para el microaglomerado en frío tipo B-1, se ha recurrido a las recomendaciones españolas y americanas para definir el espesor del tratamiento considerado en el caso de estudio. La normativa española (Ministerio de Fomento 2011) limita la aplicación de los microaglomerados *MICROF 5* a una única capa de espesor habitualmente no superior a 1,5 cm. Por su parte, la práctica en Estados Unidos considera espesores de, como máximo, dos a tres veces el tamaño máximo del árido utilizado (Gransberg 2010). Para un microaglomerado en frío *Type II*, esta consideración limitaría el espesor del tratamiento a un máximo de entre 1 y 1,5 cm. En base a estas consideraciones, en el caso de estudio se considera un espesor del microaglomerado en frío de 1,5 cm.

La aplicación del microaglomerado en frío requiere la preparación previa de la superficie mediante el sellado de grietas y la reparación de baches. Estas actividades previas se ejecutarán de acuerdo a las especificaciones recogidas en los artículos 10.3.2.1 y 10.3.2.2 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

v) Cepillado

El cepillado de pavimentos de hormigón (*diamond grinding*) reduce las irregularidades, mejorando así el nivel de servicio y prolongando la vida útil (MINVU 2008b; MOP 2014). El procedimiento aumenta la fricción entre neumáticos y pavimento y elimina las irregularidades creadas por el escalonamiento de juntas y por las deformaciones debidas a gradientes térmicos o a la construcción (MINVU 2008b; MOP 2014).

El cepillado no aumenta la capacidad estructural del pavimento pero, al minimizar los efectos dinámicos de las cargas, permite que la estructura soporte un número mayor de solicitaciones durante el resto de la vida útil (MOP 2014).

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de estos tratamientos en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 9.5.4 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

El cepillado de pavimentos de hormigón requiere la preparación previa de la superficie mediante el sellado de juntas y grietas. Estas actividades previas se ejecutarán de acuerdo a las especificaciones recogidas en los artículos 9.5.1 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

vi) Recrecido funcional

Este tratamiento, también conocido como recapado o recrecimiento, consiste en la reposición de capa de rodadura mediante una mezcla asfáltica en caliente (MOP 2014). Este tratamiento mejora la condición superficial del pavimento, no incrementando su capacidad estructural.

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de estos tratamientos en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 10.3.3.2 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

Puesto que la aplicación de recrecidos aumenta la rasante de la calzada, es aconsejable aplicar un fresado previo de la superficie. Mediante el fresado, se recorta y elimina un espesor de pavimento, dejando una superficie texturizada que sirve de base para un recrecido (MINVU 2008b; MOP 2014). Al aplicar el fresado, se garantiza que la rasante del pavimento recrecido es la misma que la existente antes del tratamiento.

En este trabajo de investigación, se considera que los tramos pertenecientes a la red estructurante recibirán un fresado previo a la aplicación del recrecido funcional. Los pavimentos de la red secundaria, en cambio, no

recibirán un fresado previo, permitiendo así un ahorro económico en la aplicación de este tratamiento.

vii) Reparación de losa de profundidad total

Esta actividad consiste en retirar el material desprendido del pavimento de hormigón que presenta un alto grado de agrietamiento y desconche (MOP 2014; TAC 2013). Una vez retirado este material y tras la limpieza de la superficie, se vierte hormigón en la superficie retirada.

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de estos tratamientos en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 9.5.5 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

viii) Reciclado in situ en caliente

Esta operación consiste en reblandecer el pavimento asfáltico existente mediante la aplicación de calor; retirándolo, a continuación, a través de medios mecánicos. Este material se mezcla con asfalto virgen y agregados creando así una nueva capa de rodadura que reemplaza al pavimento anteriormente retirado (Hicks et al. 2000; TAC 2013).

Este tratamiento se aplica cuando el pavimento presenta un nivel alto de deterioros tales como desprendimiento de áridos, segregación, grietas y ahuellamiento (TAC 2013).

A pesar de que este tratamiento no aplica habitualmente en Chile, se ha considerado en el caso de estudio para poder incluir alternativas más respetuosas con el medio ambiente.

ix) Reciclado in situ en frío

De forma similar al reciclado en caliente, el reciclado en frío emplea material de un pavimento asfáltico existente para crear una nueva capa de rodadura. Sin embargo, el reciclado en frío no precisa calentar el pavimento existente para su reutilización, sino que emplea medios mecánicos que son capaces de disgregar el material de modo que pueda ser reutilizado (Thenoux y Garcia 1999).

Este tratamiento se aplica en pavimentos en mala condición que presentan un nivel severo de agrietamiento, ahuellamiento u otros deterioros permitiendo mejorar su capacidad estructural (TAC 2013).

El uso de este tratamiento aún no está muy extendido en Chile, limitándose su aplicación al caso interurbano. Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de estos tratamientos en Chile se detallan en la sección 5.413 del Manual de Carreteras (MOP 2014).

x) Recrecido estructural

La aplicación de este tratamiento es similar al recrecido funcional, si bien el recrecido presenta un espesor mayor, de forma que se mejora la capacidad estructural del pavimento.

Las especificaciones técnicas exigidas para la aplicación de estos tratamientos en pavimentos urbanos en Chile se detallan en el artículo 5.11 del Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (MINVU 2008b).

Dado los recrecidos estructurales suelen presentar espesores considerables, en este trabajo de investigación se ha considerado que, tanto en la red estructurante como en la secundaria, la aplicación del recrecido requiere el fresado previo de la superficie. En ambos casos se garantiza, por tanto, que la rasante del pavimento recrecido es la misma que la existente antes de la aplicación del tratamiento.

xi) Reconstrucción

La reconstrucción es una técnica por la cual se retira el antiguo pavimento y se reemplaza por otro nuevo. En ciertas ocasiones se mantiene el pavimento existente pero el cálculo estructural prescinde de su aporte (MOP 2014).

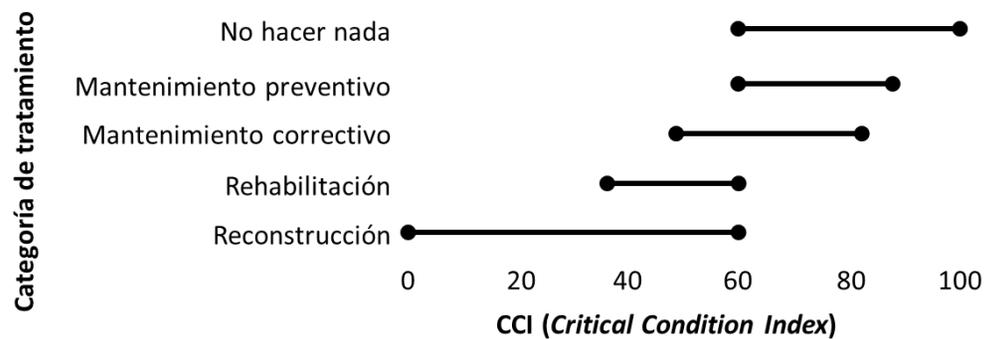
d) Umbrales de aplicación de tratamientos

Los tratamientos de conservación considerados en este estudio varían en la intensidad de la intervención, por lo que pueden ser aplicados a pavimentos con distintos tipos de deterioro y niveles de severidad. Existen distintas clasificaciones y nomenclaturas para agrupar los tratamientos en función de la intensidad de los deterioros que pueden solucionar. Una de las nomenclaturas utilizadas distingue entre mantenimiento preventivo y correctivo (Hicks et al. 2000). El mantenimiento preventivo se aplica para solucionar pequeños deterioros, retrasar el avance de deterioros progresivos y mitigar la necesidad de medidas correctivas (Hicks et al. 2000). Estos tratamientos han de aplicarse, por tanto, antes de que el pavimento muestre un deterioro significativo. Por su parte, el mantenimiento correctivo se aplica cuando existe un deterioro significativo en el pavimento (como por ejemplo, agrietamiento extensivo, pérdida de fricción, etc.) (Hicks et al. 2000). Otros estudios distinguen, en cambio, entre preservación, mantenimiento y rehabilitación (FHWA 2005) o únicamente entre tratamientos de preservación y rehabilitación (Peshkin et al. 2004; TAC 2013).

A efectos de este trabajo de investigación, los tratamientos se han clasificado en tres categorías: preservación, mantenimiento y rehabilitación. En el primero de los grupos se consideran los tratamientos que previenen la aparición de deterioros y/o que mejoran la capacidad funcional del mismo. Por su parte, en la categoría de mantenimiento se consideran aquellos tratamientos que mejoran la capacidad estructural del pavimento. Y, por último, en la categoría de rehabilitación se consideran los tratamientos que restauran completamente la capacidad funcional y estructural del pavimento. En la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se detalla la categoría considerada para los distintos tratamientos recogidos en este trabajo de investigación.

Para asegurar una selección técnicamente adecuada de los tratamientos a aplicar, los sistemas de gestión suelen contar con árboles de decisión que definen el/los tratamiento/s a aplicar en función de los tipos de deterioro e intensidad de los mismos. En este sentido, es interesante consultar los trabajos de Hicks et al. (2000), FCM y CNRC (2003) y Wei y Tighe (2004), en los que se recogen árboles de decisión utilizados por distintas administraciones americanas y canadienses.

En una gestión a nivel de red, en la que la condición del pavimento se expresa en términos de un indicador compuesto de condición, los sistemas de gestión suelen definir rangos de aplicación de las distintas categorías de tratamiento en función del indicador de condición. Así, por ejemplo, el Departamento de Transportes del Estado de Virginia, Estados Unidos (VDOT), considera cinco categorías de tratamiento aplicables en distintos rangos de su indicador de condición (CCI, *Critical Condition Index*), el cual es evaluado en una escala 0-100 (Figura 4-4).



FUENTE: Adaptado de Gosse et al. (2013)

Figura 4-4: Rango de aplicación de tratamientos en función de la condición

Para definir los rangos de aplicación de los distintos tratamientos en términos de ICPU, se llevó a cabo un estudio de los árboles de decisión empleados por distintas administraciones de conservación chilenas (MOP 2012a; b) e internacionales (Hicks et al. 2000; Peshkin et al. 2004). En este análisis, desarrollado en el marco del proyecto Fondef (Videla et al. 2010), se estudiaron los tipos de deterioro y niveles de severidad que gatillan los distintos tratamientos en los árboles de decisión. Estos

valores fueron comparados con los tramos de la red urbana de Santiago auscultados en el marco del proyecto Fondef (Videla et al. 2010); estableciendo así una relación entre los umbrales considerados en los árboles de decisión y el ICPU de los tramos auscultados. Puesto que en el momento de aplicación de la herramienta de optimización al caso de estudio, se contaba con una definición preliminar de estos rangos, es importante señalar que los valores considerados en el sistema de gestión resultante del proyecto Fondef (Videla et al. 2010) pueden diferir de los considerados en esta tesis de investigación.

Tabla 4-3: Umbral de aplicación de tratamientos en pavimentos asfálticos

Tratamiento	Clasificación	Umbral de aplicación [ICPU]	
		R. estructurante	R. secundaria
Riego de neblina	Preservación	$\geq 8,5$	-
Lechada asfáltica	Preservación	$\geq 7,5$	-
Sello de agregado	Preservación	$\geq 7,5$	-
Microaglomerado en frío	Preservación	$\geq 7,0$	-
Recrecido funcional	Preservación	$\geq 6,5$	$\geq 5,5$
Reciclado in situ en caliente	Mantenimiento	$\geq 5,5$	-
Reciclado in situ en frío	Mantenimiento	$\geq 5,5$	-
Recrecido estructural con asfalto	Mantenimiento	$\geq 4,5$	$\geq 3,5$
Reconstrucción	Rehabilitación	≥ 1	≥ 1

FUENTE: Adaptado de proyecto Fondef (Videla et al. 2010)

Tabla 4-4: Umbral de aplicación de tratamientos en pavimentos de hormigón

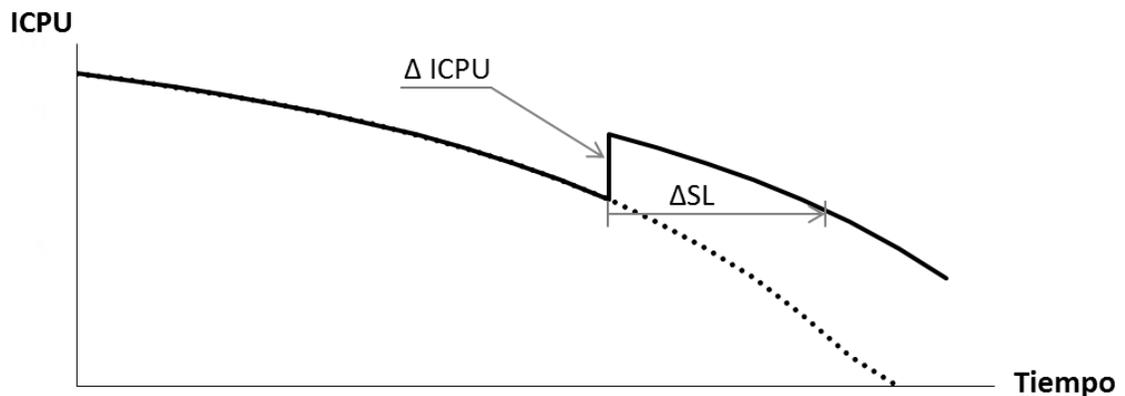
Tratamiento	Clasificación	Umbral de aplicación [ICPU]	
		R. estructurante	R. secundaria
Cepillado	Preservación	$\geq 7,0$	-
Recrecido funcional	Preservación	$\geq 7,0$	-
Reparación de losa	Mantenimiento	$\geq 4,5$	$\geq 3,5$
Recrecido estructural con asfalto	Mantenimiento	$\geq 4,5$	$\geq 3,5$

Tratamiento	Clasificación	Umbral de aplicación [ICPU]	
Recrecido estructural con hormigón	Mantenimiento	$\geq 4,5$	$\geq 3,5$
Reconstrucción	Rehabilitación	≥ 1	≥ 1

FUENTE: Adaptado de proyecto Fondef (Videla et al. 2010)

e) Efecto de la aplicación de tratamientos

La aplicación de un tratamiento produce un incremento de la vida en servicio del pavimento (ΔSL) y por tanto, un aumento en su condición ($\Delta ICPU$) en el momento de aplicación (Figura 4-5).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-5: Umbrales de aplicación de tratamientos y efecto de su aplicación

En el caso de estudio, se considera que, tras la aplicación del tratamiento, el pavimento continúa deteriorándose con el mismo modelo de deterioro que presentaba inicialmente. Si bien existen estudios en los que se han desarrollado modelos de deterioro específicos para distintos tratamientos (Ahmed et al., 2013; Khurshid et al., 2013), estos trabajos no son extrapolables al caso de estudio porque han sido desarrollados en un medio con características (tipo de pavimento, clima, diseño, etc.) distintas a los existentes en el caso de estudio. Ante la falta de datos experimentales para el desarrollo de modelos de deterioro específicos y, de acuerdo con el enfoque empleado en otros trabajos de investigación (Shatnawi et al. 2005; Giustozzi et al. 2012), se considera que la aplicación de un tratamiento retrasa el deterioro del

pavimento de acuerdo a la vida útil del tratamiento aplicado. Así, la curva de comportamiento tras la aplicación del mismo es una curva paralela a la de deterioro inicial, trasladada en el tiempo en función de la vida útil del tratamiento (Figura 4-5).

Los valores de incremento de vida útil considerados en este trabajo de investigación se han calibrado a partir de valores recopilados de estudios internacionales. Inicialmente, se partió de valores de incremento de vida en servicio (ΔSL) recogidos en distintos estudios internacionales (Hicks et al. 2000; Correa y Wong 2001; Kraemer et al. 2004; Peshkin et al. 2004; Gransberg y James 2005; Labi et al. 2007; Gransberg 2010; Chan et al. 2011; TAC 2013; Cole y Wood 2014). Sin embargo, estos valores presentaban órdenes de magnitud superiores a los esperados para el caso de estudio. Así, por ejemplo, diversos estudios (TAC 2013; Hicks et al. 2000) estiman que el recrecido funcional aumenta, en promedio, la vida en servicio del pavimento en 9 años. Teniendo en cuenta que los pavimentos asfálticos de la red de estudio presentan una vida útil de entre 10 y 15 años, y que el recrecido funcional no mejora la capacidad estructural del pavimento, se observa que el valor propuesto por los estudios internacionales es superior al esperado para el caso de estudio.

Ante esta situación, fue necesario ajustar los valores recogidos de la literatura para su aplicación al caso chileno. Para ello, se consideró un estudio desarrollado por la FHWA (Wu et al. 2010) en el que se recoge la mejora en la condición obtenida de la aplicación de distintos tratamientos. Puesto que los valores de este estudio se recopilaban en cinco administraciones americanas, las mejoras de condición están expresadas en distintos índices. Es por esto que, para poder comparar estos valores con el ICPU, se calcularon las mejoras porcentuales de condición. A partir de este aumento de condición ($\Delta ICPU$), se calculó el incremento de vida en servicio equivalente (ΔSL). Este valor fue comparado con el obtenido de la revisión de la literatura, ajustando así los valores finalmente considerados en este trabajo de investigación. Los valores obtenidos en esta calibración permitieron, además, definir un incremento máximo de condición tras la aplicación del tratamiento ($ICPU_{\text{techo}}$).

En base a estas consideraciones, la Tabla 4-5 y Tabla 4-6 recogen el incremento de vida útil de cada tratamiento, considerados en el caso de estudio, para pavimentos de asfalto y de hormigón, respectivamente. En estas tablas se recoge, además, el ICPU máximo que puede alcanzarse tras la aplicación del tratamiento ($ICPU_{techo}$). En el Anexo D se pueden consultar los valores propuestos en la literatura, así como los obtenidos del ajuste basado en el estudio de la FHWA (Wu et al. 2010).

Tabla 4-5: Efecto de la aplicación de los tratamientos en pavimentos asfálticos

Tratamiento	Incremento vida servicio (ΔSL) [años]		$ICPU_{techo}$	
	Estructurante	Secundaria	Estructurante	Secundaria
Riego de neblina	1	-	9,50	
Lechada asfáltica	2	-	9,75	
Sello de agregado	2	-	9,75	
Microaglomerado en frío	3	-	9,75	
Recrecido funcional	4	3	10,00	9,50
Reciclado in situ en caliente	5	-	10,00	
Reciclado in situ en frío	6	-	10,00	
Recrecido estructural con asfalto	8	7	10,00	10,00
Reconstrucción	15	15	10,00	10,00

FUENTE: Adaptado de (Hicks et al. 2000; Kraemer et al. 2004; Peshkin et al. 2004; Gransberg y James 2005; Labi et al. 2007; Gransberg 2010; Wu et al. 2010; Chan et al. 2011; TAC 2013; Cole y Wood 2014)

Tabla 4-6: Efecto de la aplicación de los tratamientos en pavimentos de hormigón

Tratamiento	Incremento vida servicio (ΔSL) [años]		$ICPU_{techo}$	
	Estructurante	Secundaria	Estructurante	Secundaria
Cepillado	3	-	9,75	-
Recrecido funcional	5	-	9,75	-
Reparación de losa	6	5	10,00	9,50
Recrecido est. con asfalto	7	6	10,00	10,00

Tratamiento	Incremento vida servicio (<i>ΔSL</i>) [años]		ICPU _{techo}	
Recrecido est. con hormigón	8	7	10,00	10,00
Reconstrucción	20	20	10,00	10,00

FUENTE: Adaptado de (Correa y Wong 2001; Wu et al. 2010; TAC 2013)

Este estudio considera una reducción de la efectividad de los tratamientos cuando estos son aplicados de forma repetitiva. Esta consideración, contemplada también en otros trabajos de evaluación de programas de conservación (Wei y Tighe 2004; Chamorro 2012), pretende recoger la pérdida de eficacia de los tratamientos cuando se aplica el mismo tratamiento en años consecutivos. De esta manera, se evitan situaciones, poco realistas, en las que se podría mantener de forma indefinida un pavimento aplicando, únicamente y de forma repetitiva, el mismo tratamiento.

Concretamente, en este trabajo de investigación se ha considerado una reducción del 50% en la efectividad de los tratamientos cuando estos se aplican de forma repetitiva. Este valor ha sido calibrado a partir de una serie de ensayos numéricos que han buscado limitar la aplicación consecutiva del mismo tratamiento a un máximo de tres veces consecutivas. Este criterio se ha tomado en base a los estudios de Wei y Tighe (2004) y Giustozzi et al. (2012), los cuales evalúan el intervalo óptimo de aplicación de tratamientos de preservación y mantenimiento entre ciclos de rehabilitación limitando el número de aplicaciones a un máximo de tres.

4.2.3 Parámetros económicos

Los parámetros económicos considerados corresponden con los costes unitarios de los tratamientos (Tabla 4-7 y Tabla 4-8). Los valores considerados han sido mayoritariamente tomados de contratos de pavimentación y reparación de pavimentos en la Municipalidad de Santiago así como de información del Ministerio

de Obras Públicas de Chile (Ilustre Municipalidad de Santiago y Pehuenche 2012; MOP 2012a; c, 2013). En el caso de tratamientos cuya aplicación al caso urbano no está extendida en Chile (ej. microaglomerado en frío o reciclado in situ), los costes han sido estimados a partir de datos de literatura internacional (Hicks et al. 2000; Chan y Tighe 2010a). En estos casos, se ha aplicado un coeficiente de corrección que refleja la diferencia entre el coste en la aplicación internacional y el caso chileno. Este coeficiente se ha calculado a partir de la diferencia promedio de aquellos costes en los que se disponía de datos tanto de la aplicación internacional como chilena.

Tabla 4-7: Costes de los tratamientos en pavimentos asfálticos

Tratamiento	Coste [US\$/m²]	
	Estructurante	Secundaria
Riego de neblina	2,19	-
Lechada asfáltica	4,69	-
Sello de agregado	4,90	-
Microaglomerado en frío	7,76	-
Recrecido funcional	25,90	15,86
Reciclado in situ en caliente	53,54	-
Reciclado in situ en frío	54,65	-
Recrecido estructural con asfalto	63,79	34,19
Reconstrucción	143,59	81,64

FUENTE: (Hicks et al. 2000; Peshkin et al. 2004; Chan y Tighe 2010b; Ilustre Municipalidad de Santiago y Pehuenche 2012; MOP 2012a; c, 2013)

Tabla 4-8: Costes de los tratamientos en pavimentos de hormigón

Tratamiento	Coste [US\$/m²]	
	Estructurante	Secundaria
Cepillado	14,71	-
Recrecido funcional	32,29	-

Tratamiento	Coste [US\$/m²]	
Reparación de losa	49,06	19,28
Recrecido estructural con asfalto	55,35	28,90
Recrecido estructural con hormigón	74,27	43,32
Reconstrucción	203,69	158,44

FUENTE: (Ilustre Municipalidad de Santiago y Pehuenche 2012; MOP 2012a; c, 2013)

4.2.4 Parámetros ambientales

Los parámetros ambientales cuantifican el impacto ambiental asociado a cada uno de los tratamientos. Tal y como se presentó en el capítulo 3, se propone una evaluación del impacto ambiental a partir de las emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de cada tratamiento (Tabla 4-9 y Tabla 4-10). Estas emisiones se han obtenido mediante evaluaciones con el modelo PaLATE así como a partir de referencias de estudios ambientales (Holt et al. 2009; Chan y Tighe 2010b; Chehovits y Galehouse 2010; Robinette y Epps 2010; Weiland y Muench 2010; Chan et al. 2011; Giustozzi et al. 2011). Como complemento a la evaluación propuesta, en el Anexo E se recogen otros indicadores ambientales obtenidos con PaLATE.

En la evaluación del impacto ambiental con el modelo PaLATE se han considerado las siguientes distancias de transporte: 40 km a la planta de producción de áridos; 20 km a la planta asfáltica y 25 km a vertedero autorizado. Estos valores corresponden con las distancias medias entre la municipalidad de Macul y los centros de producción y vertido, de acuerdo a la información suministrada por empresas y estudios chilenos (Cabrera 2013; Bitumix 2014; Sunoil 2014).

Tabla 4-9: Emisiones de CO₂ de los tratamientos en pavimentos asfálticos

Tratamiento	Emisiones [kg CO ₂ /m ²]	
	Estructurante	Secundaria
Riego de neblina	0,04	-
Lechada asfáltica	0,32	-
Sello de agregado	0,43	-
Microaglomerado en frío	1,51	-
Recrecido funcional	6,75	6,68
Reciclado in situ en caliente	6,70	-
Reciclado in situ en frío	5,49	-
Recrecido estructural con asfalto	13,11	7,66
Reconstrucción	27,36	13,78

FUENTE: Evaluaciones en PaLATE y referencias de estudios internacionales (Chan et al. 2011; Chehovits y Galehouse 2010; Giustozzi et al. 2011; Robinette y Epps 2010)

Tabla 4-10: Emisiones de CO₂ de los tratamientos en pavimentos de hormigón

Tratamiento	Emisiones [kg CO ₂ /m ²]	
	Estructurante	Secundaria
Cepillado	0,02	-
Recrecido funcional	6,67	-
Reparación de losa	9,62	4,81
Recrecido estructural con asfalto	22,56	13,16
Recrecido estructural con hormigón	13,60	7,93
Reconstrucción	40,63	24,38

FUENTE: Evaluaciones en PaLATE y referencias de estudios internacionales (Holt et al. 2009; Weiland y Muench 2010)

4.2.5 Decisiones tomadas a nivel estratégico

En este estudio se ha considerado un periodo de análisis (*T*) de 25 años. Este periodo ha sido seleccionado con el objetivo de analizar un ciclo completo de vida útil de los

pavimentos, de forma que se pueda considerar la aplicación de tratamientos de preservación, mantenimiento y rehabilitación. Teniendo en cuenta que los modelos de deterioro han sido desarrollados para periodos de 20 años para pavimentos de asfalto y 25 para pavimentos de hormigón y que en la evaluación económica debe considerarse el mismo periodo de análisis en la evaluación de las distintas alternativas, el periodo considerado corresponde el mayor de ambos valores.

La tasa de descuento (i) considerada en esta aplicación es del 6%, la cual corresponde a lo establecido por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile (Ministerio de Desarrollo Social 2014) para la evaluación de proyectos sociales.

En relación a la restricción técnica, se ha considerado que ninguno de los tramos de la red puede presentar una condición que exija la rehabilitación del mismo. Teniendo en cuenta los umbrales de aplicación de tratamientos presentados en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4, estos valores se corresponden con un $ICPU_{min}$ de 4,5 para pavimentos de la red estructurante y 3,5 para la red secundaria.

La capacidad presupuestaria considerada se ha establecido mediante una simulación basada en la práctica actual de conservación de la red urbana en Chile. En la actualidad, se observa una conservación reactiva de los pavimentos, que son tratados cuando presentan altos niveles de deterioro, mediante la aplicación de recrecidos asfálticos. Este escenario, denominado de aquí en adelante, escenario base o de política reactiva, pretende establecer una simulación de los gastos derivados de la política actual de conservación.

La simulación de la política reactiva actual (cuyo detalle se presenta en el Anexo G) permite establecer un escenario presupuestario de referencia con el que se compararán los programas de conservación obtenidos con la herramienta de optimización. Este presupuesto se ha calculado a partir de los costes totales actualizados necesarios para conservar la red durante el periodo de 25 años bajo la política reactiva descrita anteriormente. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el presupuesto anual equivalente asciende a un monto de 210.750 US\$. Este presupuesto corresponde con una dotación presupuestaria de, aproximadamente, 6.39 US\$/m²/año. Puesto que esta dotación es superior a las dotaciones de conservación habituales en carreteras, resulta conveniente aclarar dos aspectos que inciden, de forma significativa, en el valor obtenido: el coste unitario de aplicación del recrecido y el número de veces que se aplica este tratamiento en el periodo de análisis.

Por una parte, el coste unitario del recrecido estructural considerado en la simulación es, previsiblemente, superior al real. En base a las entrevistas realizadas con los responsables del mantenimiento de la red, los recrecidos aplicados actualmente deberían clasificarse como “funcionales”. De hecho, en la mayoría de casos, estos recrecidos se aplican actualmente sin un fresado previo del firme, lo cual indica que los espesores aplicados son inferiores a los requeridos para una mejora estructural. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es comprensible que el coste del recrecido considerado en la simulación sea superior al aplicado en la actualidad, el cual resulta técnicamente poco apropiado e insuficiente.

Así mismo, el número de aplicaciones considerado en la simulación es, probablemente, superior al real. La simulación considera una política de conservación por respuesta, de forma que el tratamiento se aplica cuando la condición del pavimento alcanza un valor dado. De acuerdo con los umbrales de condición mínimos definidos anteriormente ($ICPU_{min}$), el programa de conservación simulado considera que los recrecidos estructurales se aplican cuando la condición alcanza el valor mínimo de condición. En el momento de redacción de la tesis doctoral, los valores considerados eran los recomendados, por parte del proyecto Fondef (Videla et al. 2010), como condición mínima para los pavimentos urbanos en Chile. Sin embargo, de acuerdo a las campañas de auscultación llevadas a cabo en el marco del proyecto Fondef (Videla et al. 2010), este nivel de condición mínimo no se garantiza actualmente en la red de Santiago. Teniendo en cuenta la estrecha relación entre el presupuesto de conservación y los niveles mínimos exigidos, es esperable que en el desarrollo final del sistema de gestión derivado del proyecto Fondef (Videla et al. 2010), estos umbrales sean ajustados. En cualquier caso, a efectos de este trabajo de investigación, la dotación presupuestaria considerada es coherente con los niveles de calidad recomendados en este estudio para la conservación de los pavimentos urbanos en Chile, los cuales se reflejan en sus costes de aplicación y en los niveles de condición mínimo exigidos. Así mismo, el nivel de calidad considerado en la simulación para calcular la dotación presupuestaria es coherente con el utilizado en el proceso de optimización.

En conclusión, es importante señalar que este escenario no refleja el presupuesto real de la entidad a cargo de la conservación de los tramos analizados ni se corresponde

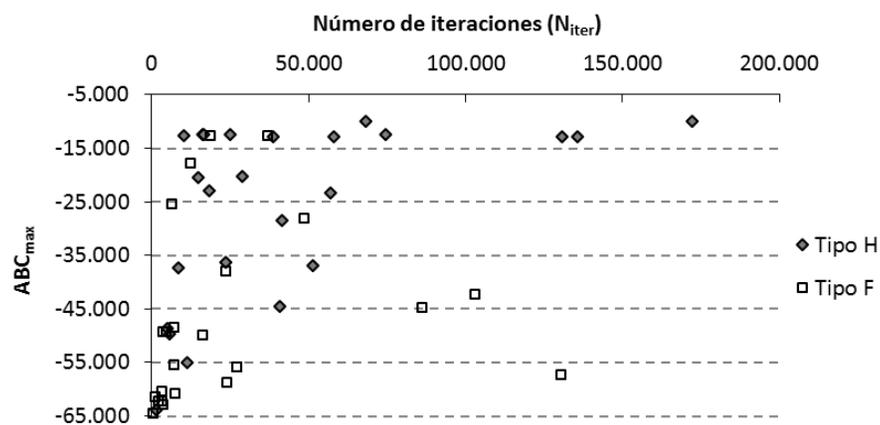
con el presupuesto óptimo para conservar la red, ya que es previsible que una conservación preventiva de la misma permita reducir los costes necesarios para su gestión. Así mismo y, de acuerdo a lo señalado anteriormente, es importante recalcar que el presupuesto de conservación está estrechamente ligado con los umbrales mínimos de condición exigidos. En esta investigación, estos valores son considerados como un parámetro del problema, ya que el objetivo de la herramienta es optimizar la asignación del presupuesto disponible para conservar una red de activos. Queda, por tanto, fuera del alcance de esta investigación (y propuesto como futura línea de investigación) la evaluación de necesidades y la optimización del presupuesto disponible para conservar la red en función del nivel mínimo de servicio exigido.

4.3 Aplicación Monobjetivo de los Algoritmos Heurísticos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos heurísticos descritos en el capítulo 3 para resolver el problema del caso de estudio considerando una única función objetivo. Esta aplicación permite explorar la viabilidad de estos algoritmos. De esta forma, la optimización posterior (multiobjetivo) se centrará en aquellos algoritmos que hayan resultado más exitosos en el análisis monobjetivo. Para esta aplicación preliminar se ha considerado la función objetivo definida por la Ecuación (3.8), la cual busca el programa de conservación con mayor efectividad transformando el problema condicionado en uno no condicionado por la aplicación de funciones de penalización.

4.3.1 Gradiente (GFB)

A partir de los resultados obtenidos (recogidos en detalle en el Anexo H) se puede concluir que la heurística GFB partiendo de soluciones iniciales aleatorias resulta poco eficiente para resolver el problema de asignación de recursos de conservación. De hecho, de acuerdo al diseño experimental presentado en el capítulo 3, ninguno de los experimentos numéricos realizados es capaz de encontrar una solución factible, es decir, que cumpla las restricciones económicas y técnicas del problema. A pesar de esta limitación, los experimentos numéricos realizados permiten determinar qué movimiento resulta más eficiente en la exploración de soluciones.



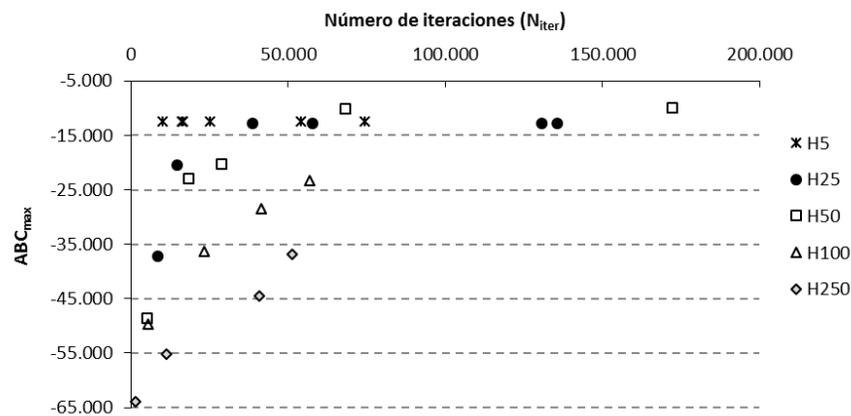
FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-6: Calibración del tipo de movimiento en GFB

Respecto al movimiento más conveniente, se observa que los movimientos libres (tipo H) resultan en mejores soluciones que las obtenidas con los movimientos fijos (tipo F). Esta conclusión se deriva de los resultados óptimos obtenidos en los ensayos numéricos realizados para los movimientos tipo F y H (Figura 4-6). Puesto que uno de los criterios habituales para la calibración de los algoritmos heurísticos es el

número de iteraciones necesarias para alcanzar el mejor resultado de la optimización, en la Figura 4-6 se observa que, a igual número de iteraciones, el movimiento tipo F obtiene peores soluciones que el movimiento tipo H.

Una vez definido el tipo de movimiento más conveniente, es necesario calibrar el número de variables a modificar en cada movimiento y el criterio de parada. Para ello se analizaron los valores máximos obtenidos con el movimiento tipo H (Figura 4-7).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-7: Valores máximos con movimientos libres obtenidos con GFB

En términos máximos, el movimiento con mejores resultados es el H5, H25 y H50, que corresponden con una modificación de hasta 5, 25 o 50 variables. Entre estos movimientos, la mejor solución óptima se obtiene con el movimiento H50 y 5.000 iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$). Sin embargo, esta solución mejora la efectividad en sólo el 1%, respecto a la obtenida con un criterio de parada de 1.000 iteraciones; precisando para ello más del doble de iteraciones (172.145 iteraciones en el caso de $N_{itersm,max}=5.000$ frente a las 68.120 iteraciones en el caso de $N_{itersm,max}=1.000$).

Ante esta mejora computacional, se identifica como solución más eficiente la obtenida con el movimiento H50 y un criterio de parada de 1.000 iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$). Se mantendrá, por tanto el movimiento H50 para el resto de heurísticas analizadas. En la Tabla 4-11 se muestran las características del programa de conservación óptimo obtenido con la heurística GFB. Como complemento de esta información, en el Anexo H se recogen los detalles de la solución óptima obtenida.

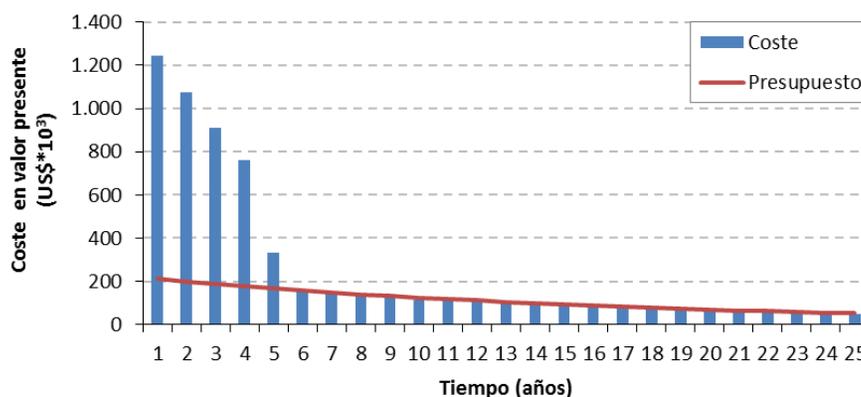
Tabla 4-11: Características de la solución óptima con GFB

Presupuesto [US\$]	2.855.720
Coste [US\$]	6.180.660
ABC_{max} [ICPU·años]	4.514
Penalización [ICPU·años]	14.559
ABC_{max} Penalizada [ICPU·años]	-10.045
Número iteraciones [ud]	68.120
\overline{ABC}_{max}	-43.937
σ_{ABCmax}	36.789
Emisiones [kg CO2]	1.453.610

FUENTE: Elaboración propia

La importante penalización de la solución óptima encontrada con el algoritmo GFB se debe al incumplimiento de la restricción presupuestaria. Este incumplimiento se da tanto en valores totales, con un coste total que duplica el presupuesto disponible; como en valores anuales, con un coste significativamente mayor al disponible durante los primeros años del periodo de análisis (Figura 4-8). El alto coste del programa, durante los primeros años de análisis, se debe a que el programa considera un gran número de tratamientos que mejoran la condición de los tramos a valores de

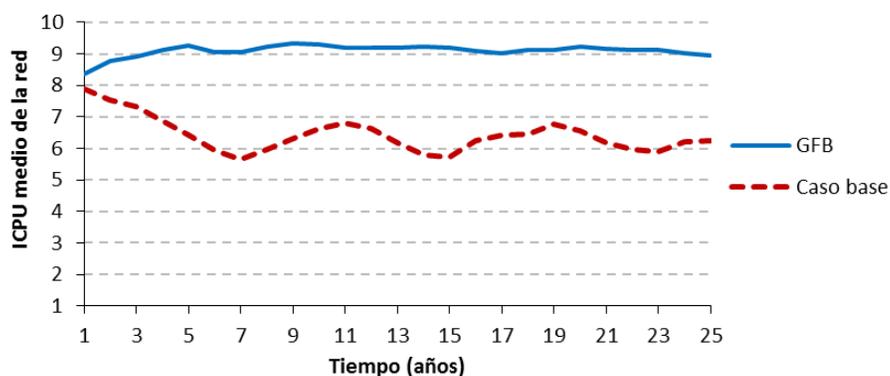
ICPU en los que es posible aplicar tratamientos de preservación. Puesto que los tratamientos de preservación tienen costes significativamente inferiores a los de mantenimiento y rehabilitación (Tabla 4-7 y Tabla 4-8), resulta más sencillo cumplir la restricción económica del problema en los siguientes años del periodo de análisis.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-8: Flujo de costes anuales del programa óptimo GFB

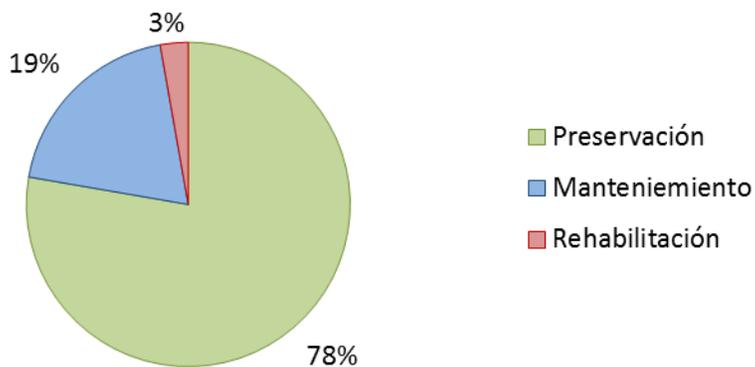
Por lo tanto, si bien la heurística GFB permite diseñar programas de conservación con una condición media de la red significativamente superior a la obtenida con la política reactiva del caso base (Figura 4-9), esta solución no resulta factible porque no cumple la restricción económica del problema.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-9: Condición media de la red con GFB y el caso base

En relación a los tratamientos seleccionados en el programa óptimo con GFB, se observa una tendencia a utilizar tratamientos de preservación basados, mayoritariamente en lechadas asfálticas (Figura 4-10). Estas lechadas son aplicadas en pavimentos de asfalto, mientras que los pavimentos de hormigón son tratados con recrecidos estructurales tanto de hormigón como de asfalto.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-10: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con GFB

Por lo tanto, si bien la heurística GFB permite diseñar programas de conservación con una condición media de la red significativamente superior a la obtenida con la política reactiva del caso base, esta solución no resulta factible porque no cumple la restricción económica del problema.

4.3.2 Aceptación por Umbrales (TA)

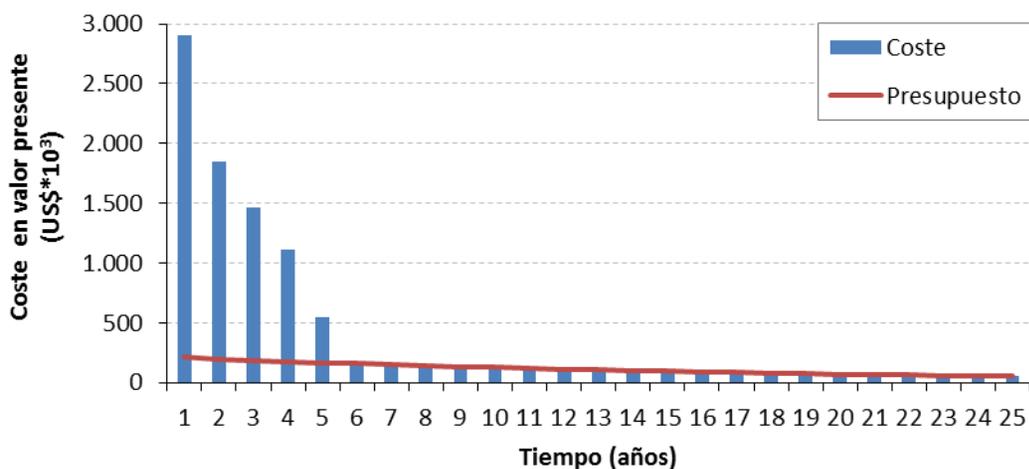
A la vista de las características de la solución óptima obtenida con TA (Tabla 4-12) se puede concluir que la heurística TA tampoco resulta eficiente para resolver el problema de asignación de recursos de conservación.

Tabla 4-12: Características de la solución óptima con TA

Presupuesto [US\$]	2.855.720
Coste [US\$]	9.720.500
ABC_{max} [ICPU·años]	4.571
Penalización [ICPU·años]	16.727
ABC_{max} Penalizada [ICPU·años]	-12.155
Número iteraciones [ud]	196.803
\overline{ABC}_{max}	-35.538
$\sigma_{ABC_{max}}$	16.569
Emisiones [kg CO2]	2.000.090

FUENTE: Elaboración propia

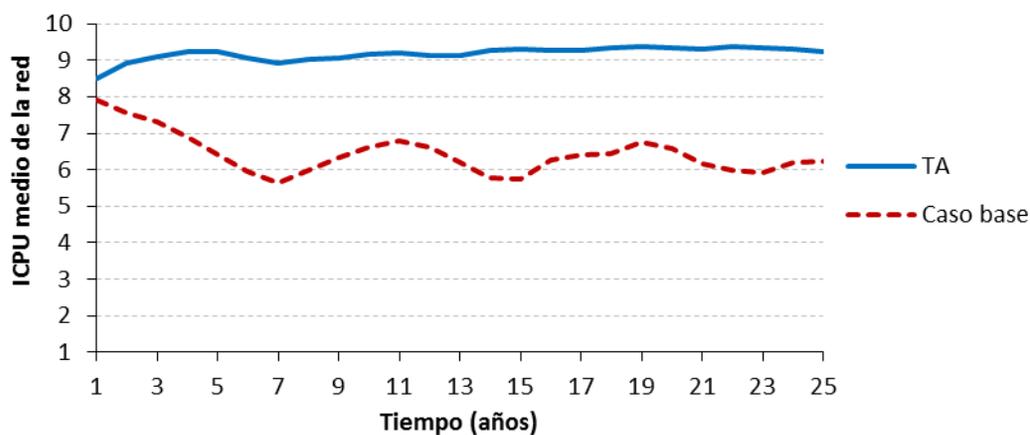
La heurística TA (cuyos resultados en detalle se recogen en el Anexo H) obtiene, en términos medios, mejores soluciones que las obtenidas con GFB (Tabla 4-11), si bien la solución óptima es ligeramente peor. En cualquier caso, la heurística TA, al igual que el GFB, resulta en programas de conservación que no satisfacen las restricciones del problema porque su coste (tanto total como el anual en los primeros años de análisis) es significativamente superior al presupuesto disponible (Figura 4-11). En estos años, y de manera análoga a la observada en la aplicación con GFB, el programa óptimo con TA mejora la condición de la red a valores en los que pueden aplicarse tratamientos de preservación resultando, por tanto, más sencillo cumplir la restricción económica del problema en los siguientes años del periodo de análisis.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-11: Flujo de costes anuales del programa óptimo TA

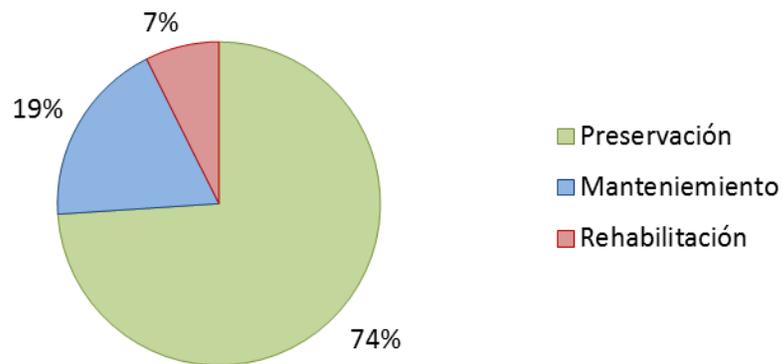
En términos de condición, el algoritmo TA resulta en un programa de conservación que aumenta de forma significativa la condición media de la red respecto a la obtenida bajo una política reactiva (Figura 4-12). Sin embargo, puesto que su coste es superior al presupuesto disponible, constituye una solución no factible del problema.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-12: Condición media de la red con TA y el caso base

En relación a los tratamientos seleccionados en el programa de conservación óptimo con TA, se observa una tendencia a aplicar tratamientos de preservación (Figura 4-13). En estos casos, al igual que sucedía en el programa óptimo con GFB, el tratamiento de preservación mayormente empleado es la lechada asfáltica en pavimentos de asfalto. Los pavimentos de hormigón, en cambio, se tratan mayoritariamente con recrecidos estructurales.

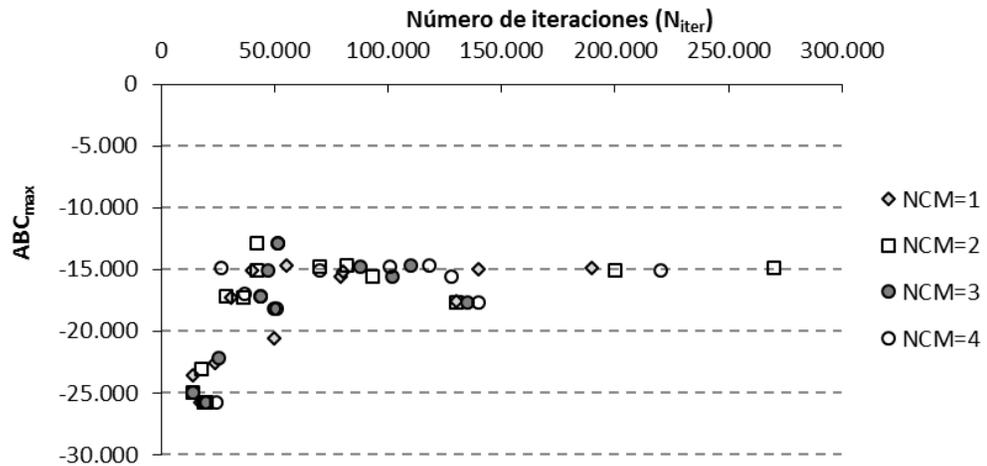


FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-13: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con TA

4.3.3 Recocido Simulado (SA)

La heurística SA (cuyos resultados en detalle se recogen en el Anexo H) tampoco es capaz de encontrar ninguna solución factible al problema. En la calibración de la heurística se observa que el algoritmo es incapaz de mejorar las soluciones óptimas a pesar de aumentar el número de cadenas de Markov (Figura 4-14).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-14: Calibración del número de cadenas de Markov en SA

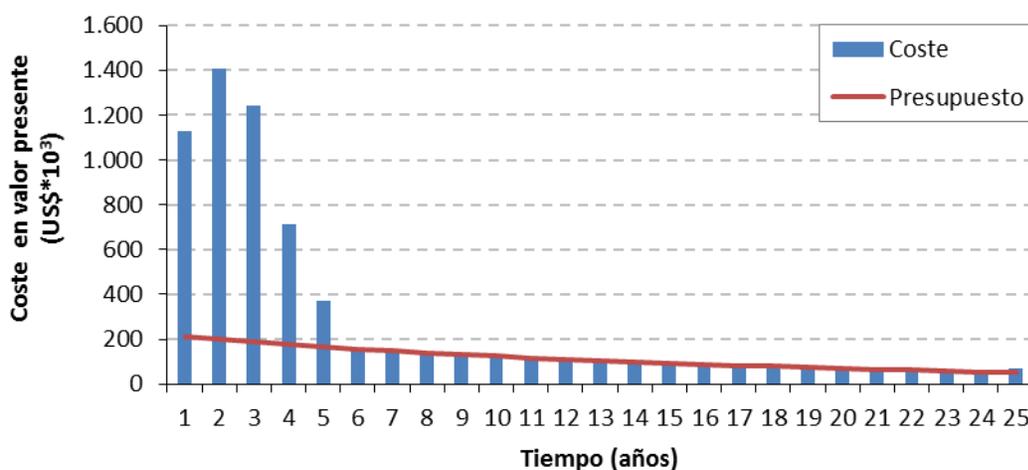
La solución de mayor efectividad obtenida con SA, cuyas características se presentan en la Tabla 4-13, se corresponde con un coeficiente de enfriamiento (r) de 0,8, una longitud de cadena de Markov (L_m) de 250 iteraciones y un criterio de parada de 3 cadenas de Markov sin mejoras ($NCM_{sm,max}$).

Tabla 4-13: Características de la solución óptima con SA

Presupuesto [US\$]	2.855.720
Coste [US\$]	6.746.998
ABC_{max} [ICPU·años]	4.548
Penalización [ICPU·años]	17.403
ABC_{max} Penalizada [ICPU·años]	-12.855
Número iteraciones [ud]	51.250
\overline{ABC}_{max}	-35.044
σ_{ABCmax}	20.597
Emissiones [kg CO2]	1.549.310

FUENTE: Elaboración propia

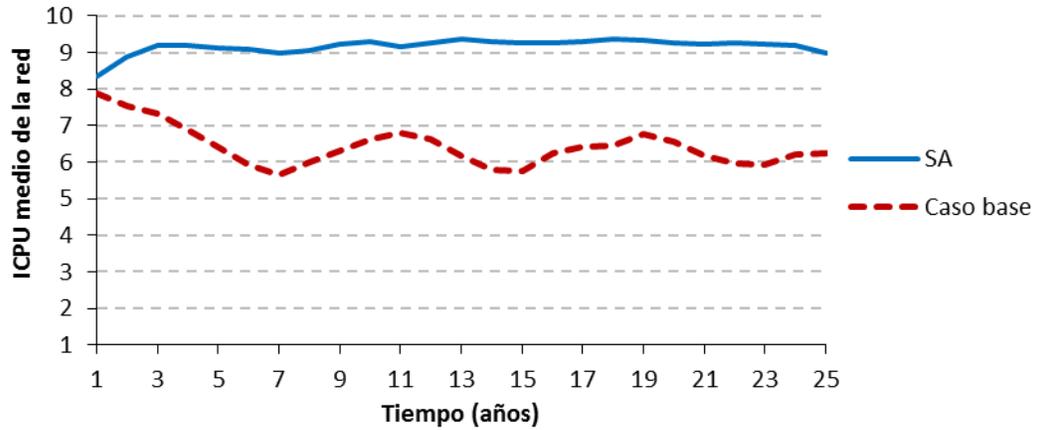
El algoritmo SA, al igual que los aplicados anteriormente (GFB y TA), no es capaz de encontrar una solución factible al problema. Si bien la solución óptima encontrada cumple la restricción técnica, garantizando así una condición superior al mínimo exigido para todos los tramos de la red; el coste de este programa de conservación excede, el presupuesto disponible (Figura 4-15).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-15: Flujo de costes anuales del programa óptimo SA

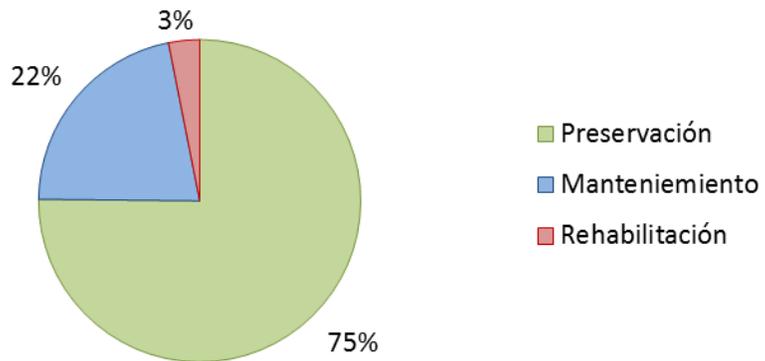
En términos de condición, el algoritmo SA consigue incrementar de forma significativa la condición media de la red respecto a la del caso base (Figura 4-16). Concretamente, a partir del tercer año, se alcanzan condiciones promedio de ICPU superiores a 9, lo que permite conservar la red con tratamientos de preservación siendo más sencillo cumplir la restricción económica del problema. Sin embargo, al igual que las heurísticas anteriores (GFB y TA), esta solución constituye una solución no factible del problema porque no cumple la limitación presupuestaria del problema.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-16: Condición media de la red con SA y el caso base

En relación a los tratamientos seleccionados en el programa de conservación óptimo con SA, se observa una tendencia similar a la observada en las heurísticas GFB y TA, en la que predominan los tratamientos de preservación (Figura 4-17). Estos están mayoritariamente aplicados en pavimentos de asfalto y consisten en lechadas asfálticas. Los pavimentos de hormigón, en cambio, son mayoritariamente tratados con tratamientos de mantenimiento basados en recrecidos estructurales.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-17: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con SA

A la vista de estos resultados, se concluye que el algoritmo SA tampoco es eficiente para resolver el problema de asignación de recursos de conservación. A pesar de esta ineficiencia, es interesante señalar que el SA obtiene soluciones similares a los algoritmos anteriores requiriendo para ello un menor número de iteraciones (Tabla 4-13). Por lo tanto, si bien no resulta eficiente para encontrar soluciones factibles del problema, resulta computacionalmente más eficiente que el TA y GFB.

4.3.4 GRASP

El algoritmo GRASP, al igual que los algoritmos anteriormente ensayados, fue incapaz de encontrar una solución factible del problema (Tabla 4-14).

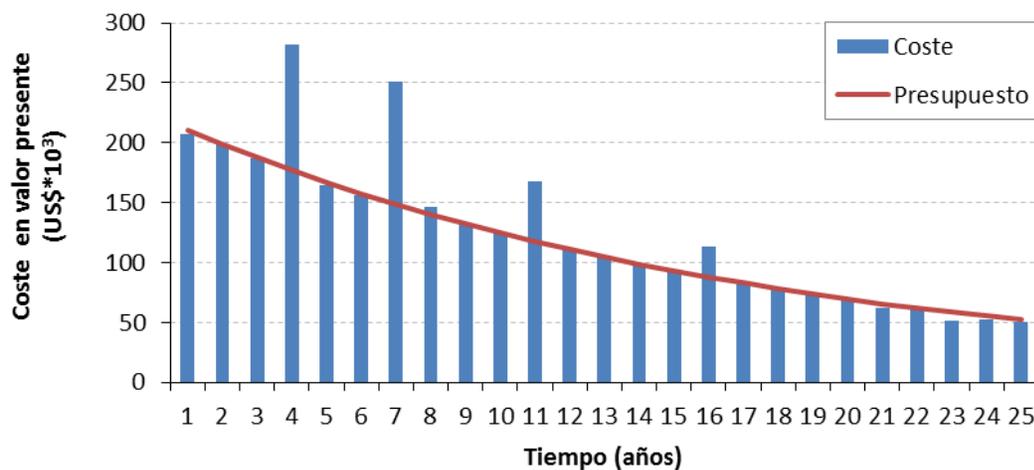
Tabla 4-14: Características de la solución óptima con GRASP

Presupuesto [US\$]	2.855.720
Coste [US\$]	3.112.414
ABC_{max} [ICPU·años]	4.263
Penalización [ICPU·años]	104.882
ABC_{max} Penalizada [ICPU·años]	-100.619
Número iteraciones [ud]	18.522
\overline{ABC}_{max}	-121.186
$\sigma_{ABC_{max}}$	28.270
Emisiones [kg CO ₂]	988.247

FUENTE: Elaboración propia

Sin embargo, la solución óptima diseñada con GRASP presenta diferencias significativas con las obtenidas con GFB, TA y SA. En términos económicos, la

solución con GRASP supera, en cuatro años del periodo de análisis, el presupuesto disponible (Figura 4-18). Sin embargo, el sobrecoste de estas soluciones es significativamente inferior al obtenido con el resto de heurísticas. Esto se debe al proceso de construcción de soluciones con GRASP, que garantiza el cumplimiento de la restricción económica. Esto garantiza que, en la fase de mejora, el coste del programa óptimo no se desvíe excesivamente del presupuesto disponible.



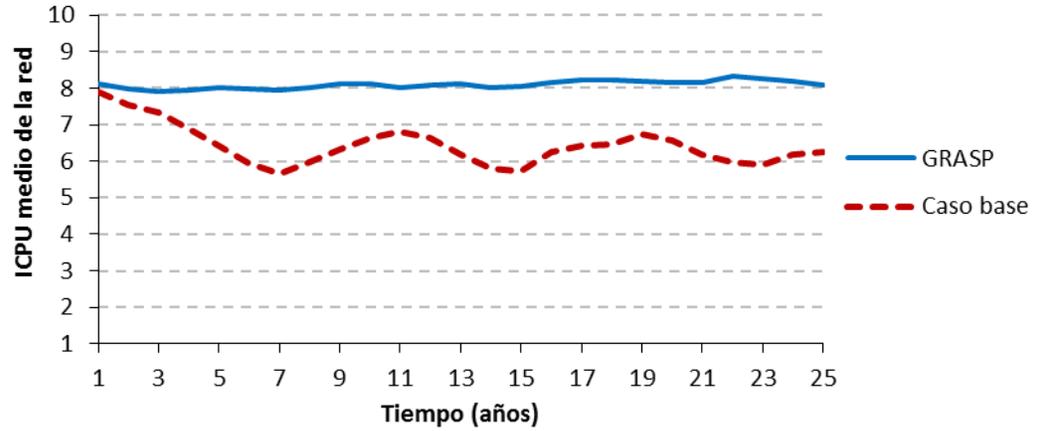
FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-18: Flujo de costes anuales del programa óptimo GRASP

A pesar de que la heurística GRASP presenta un coste más ajustado que las heurísticas anteriores, se observa que la penalización de la solución óptima es muy superior a la obtenida en GFB, TA y SA (Tabla 4-14). Esta elevada penalización se debe a un incumplimiento de la restricción técnica, ya que la solución óptima con GRASP incumple, para uno de los tramos de la red, la condición mínima exigida.

En términos de condición, el programa óptimo diseñado con GRASP permite aumentar la condición media de la red a lo largo del periodo de análisis (Figura

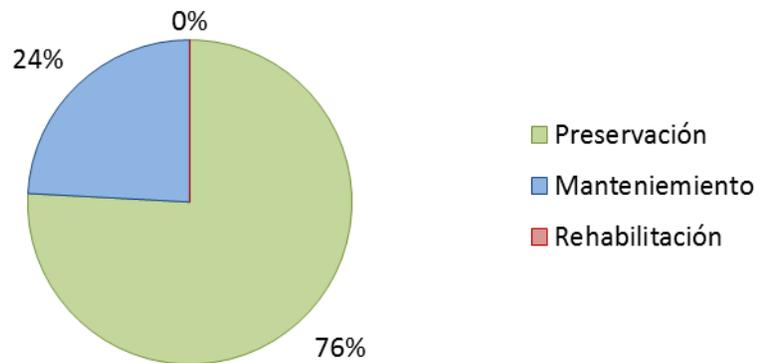
4-19). Sin embargo, esta solución no es factible porque no se cumplen las restricciones del problema.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-19: Condición media de la red con GRASP y el caso base

En relación a los tratamientos empleados, la heurística GRASP aplica, en la mayoría de los casos, tratamientos de preservación. Estos tratamientos consisten, principalmente, en lechadas asfálticas y recrecidos funcionales con asfalto para pavimentos de asfalto y cepillados para pavimentos de hormigón.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4-20: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con GRASP

Esta aplicación (desarrollada de acuerdo al diseño experimental presentado en el capítulo 3 y cuyos resultados detallados se recogen en el Anexo H) permitió además verificar que la construcción de soluciones con una selección probabilística de candidatos ($\eta > 0$) resulta en mejores soluciones que la elección determinista. De hecho, la selección probabilística de candidatos con $\eta = 0,10$ resultó en soluciones más efectivas tanto en términos máximos como promedio (Tabla 4-15). Concretamente, la mejor solución (sombreada en la Tabla 4-15) fue la construida con $\eta = 0,10$ y una mejora con GFB (la cual se realizó con movimiento H5 y un criterio de parada de $N_{itersm,max} = 1.000$ iteraciones).

Tabla 4-15: Calibración del parámetro probabilístico y GFB en GRASP

	η			
	0,00	0,10	0,25	0,50
ABC_{max}	-105.656	-100.619	-100.643	-105.881
Penalización	109.893	104.882	104.905	110.092
$N_{iteraciones}$	16.892	18.522	14.875	8.307
\overline{ABC}_{max}	-195.511	-121.186	-132.806	-170.465
σ_{ABCmax}	-	28.270	34.909	45.587
Movimiento GFB	H5	H5	H5	H5
$N_{itersm,max} GFB$	1.000	1.000	500	500

FUENTE: Elaboración propia

Cabe mencionar que la heurística GRASP se aplicó también con una búsqueda local basada en TA considerando los valores de los parámetros calibrados en la heurística GFB ($\eta = 0,10$, movimiento H5 y $N_{itersm,max} = 1.000$ iteraciones). Sin embargo, las soluciones obtenidas en estas aplicaciones fueron peores a las obtenidas con GFB.

Esto parece deberse a la fragilidad de las soluciones construidas. Si bien estas soluciones son inicialmente factibles (porque han sido construidas cumpliendo la limitación presupuestaria), el cumplimiento de las restricciones se rompe en el post-proceso de mejora con TA. Dada la naturaleza de la búsqueda TA y sus similitudes con el SA, es esperable que se obtengan resultados similares al aplicar este último como búsqueda local.

El algoritmo GRASP con búsqueda local con GFB resulta, por tanto, en una mejora respecto al resto de algoritmos heurísticos explorados, ya que el programa óptimo con GRASP tiene un sobrecoste significativamente inferior al obtenido con GFB, TA y SA. La solución óptima con GRASP, sin embargo, incumple la restricción técnica en una de las secciones de la red. Ante esta situación, se propone desarrollar un algoritmo híbrido que mejore la condición técnica obtenida con GRASP manteniendo, a su vez, las ventajas encontradas para el cumplimiento de la restricción económica.

4.3.5 Búsqueda Local Guiada (GLS)

La GLS permite incorporar una función que guía la búsqueda en base a una característica (*solution feature*) cumplida únicamente por determinadas soluciones del problema. Puesto que su aplicación considera un algoritmo de búsqueda local, se puede considerar que el algoritmo resultante es un algoritmo híbrido. Dado que las soluciones encontradas con GRASP presentan problemas para cumplir la restricción

técnica del problema, se detecta la oportunidad de aplicar una búsqueda local guiada que permita suplir esta deficiencia de la heurística GRASP.

4.4 Discusión y Conclusiones Derivadas de la Optimización Monobjetivo

En base a los resultados obtenidos se concluye que las heurísticas GFB, TA, SA son poco eficientes para resolver el problema de asignación de recursos de conservación considerando una optimización monobjetivo. Las soluciones obtenidas en estos casos exceden, considerablemente, la restricción económica del problema. La ineficiencia de estas heurísticas para resolver el problema monobjetivo parece deberse a la naturaleza de los movimientos aplicados en la exploración del espacio de soluciones.

Tal y como se describió en el capítulo 3, las heurísticas GFB, TA y SA están basadas en búsquedas locales que exploran el espacio de soluciones mediante movimientos que alteran en pequeña medida la solución de partida. En el caso de estudio, cada movimiento consiste en cambiar el tratamiento aplicado en uno de los tramos de la red para un determinado año de análisis. Sin embargo, las alternativas de tratamiento consideradas en esta investigación, presentan diferencias considerables en términos económicos y técnicos. Ante esta situación, los movimientos en la búsqueda local no son “pequeños” y generan cambios importantes en la solución de partida; resultando poco eficientes las heurísticas basadas en búsquedas locales.

Teniendo en cuenta esto, sería esperable que los algoritmos basados en búsquedas locales (GFB, TA y SA) resulten en mejores soluciones al problema si las

alternativas de conservación consideradas presentasen una variación gradual en sus características. Este es el caso de la aplicación exitosa del algoritmo GFB presentada en el trabajo de Tsunokawa et al. (2006), en el cual se optimizaba el espesor y tiempo de aplicación de un recocado asfáltico para una sección de firme.

El algoritmo GRASP, basado en un método constructivo, resulta en soluciones con un sobrecoste significativamente inferior al obtenido con las heurísticas anteriores. Esto se debe al proceso de construcción de soluciones con GRASP; en el que se garantiza el cumplimiento de la restricción económica. Las soluciones óptimas obtenidas con GRASP, sin embargo, presenta dificultades para obtener soluciones que cumplan la restricción técnica del problema.

Ante esta situación, se propone considerar un método híbrido entre los algoritmos GRASP y GLS de forma que, la función voraz (*greedy function*) utilizada para la construcción de soluciones, incluya una función que penaliza aquellas soluciones que no cumplen la restricción técnica. En esta nueva función voraz para la construcción de soluciones se propone, además, incorporar el criterio ambiental. Las características del algoritmo híbrido propuesto se detallan en el capítulo 5.

5 DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN ALGORITMO HÍBRIDO MULTI OBJETIVO PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE

En una segunda fase de la investigación se abordó el problema de optimización incluyendo en el análisis la consideración ambiental. Con este enfoque se busca diseñar programas de conservación más sostenibles, de forma que los tratamientos a aplicar sean técnicamente apropiados, económicamente viables pero también más respetuosos con el medioambiente.

Para llevar a cabo esta optimización multiobjetivo se propone un algoritmo heurístico híbrido que resulta en soluciones computacionalmente más eficientes que las obtenidas con los algoritmos heurísticos explorados en el capítulo 4. El algoritmo heurístico permite, además, una gestión más sostenible de infraestructura porque incorpora el aspecto ambiental en la evaluación de alternativas.

En este capítulo se presenta, en primer lugar, el algoritmo híbrido propuesto para la optimización de programas de conservación. Este algoritmo permite considerar, simultáneamente, objetivos técnicos y ambientales. A continuación, se presenta el diseño experimental y los resultados de la calibración de la herramienta propuesta. En base a esta calibración, el algoritmo es validado mediante la comparación de los programas obtenidos con el algoritmo propuesto y los obtenidos con el algoritmo que resultó más eficiente en las aplicaciones presentadas en el capítulo 4. Una vez validada la herramienta, se presentan los resultados obtenidos en la optimización multiobjetivo. Finalmente, se lleva a cabo un estudio de sensibilidad a la restricción presupuestaria. En base a los resultados obtenidos en estas aplicaciones, se derivan las conclusiones de la aplicación de la herramienta híbrida propuesta.

5.1 Algoritmo Híbrido Multiobjetivo Basado en GRASP y GLS

En la aplicación multiobjetivo se propone una heurística híbrida basada en GRASP que incorpora las siguientes modificaciones:

- Consideración de un coeficiente ambiental (β_{amb}) que permite incorporar los aspectos medioambientales en la evaluación de alternativas.
- Integración de un algoritmo GLS en la construcción de soluciones con GRASP. Dado que la aplicación de la heurística GRASP presentada en el capítulo 4 resultó en programas de conservación óptimos que tienen dificultades para cumplir la restricción técnica del problema, se propone incorporar la heurística GLS para mejorar el proceso de construcción de soluciones. Puesto que las soluciones construidas son mejoradas con una búsqueda local basada en GFB, el algoritmo resultante es un algoritmo híbrido denominado, de aquí en adelante, GRASP-GLS-GFB.
- Relajación de la restricción presupuestaria en la fase de construcción de soluciones.

A continuación se detalla cómo se incorporan estas modificaciones en la fase de construcción y mejora del algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB.

5.1.1 Fase de construcción algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB

El algoritmo propuesto introduce dos modificaciones en la función voraz (*greedy function*) utilizada para la construcción de soluciones. Por una parte, en el primer término de la función voraz (Ecuación (5.1)), se incorpora el coeficiente ambiental (β_{amb}) que permite incorporar los aspectos medioambientales en la evaluación de

alternativas de conservación. Por otra, se introduce un segundo término (Ecuación (5.1)) que incorpora los principios de la búsqueda local guiada (GLS).

$$GF_{n,s_n} = \beta_{amb} \cdot (ABC_{n,s_n} - ABC_{n,0}) + \lambda \cdot (T - t_{fallo,0}) \cdot I(\mathbf{x}) \quad (5.1)$$

Donde, β_{amb} es el coeficiente ambiental definido en la Ecuación (5.2); $(ABC_{n,s_n} - ABC_{n,0})$ es el incremento del área bajo la curva de comportamiento (ABC) derivado de aplicar el tratamiento s_n sobre el tramo en evaluación n respecto a la alternativa de no aplicar ningún tratamiento; λ el parámetro del algoritmo GLS que controla la importancia de la penalización; $(T - t_{fallo,0})$ es la función de penalización; y $I(\mathbf{x})$ es la función dicotómica de caracterización de soluciones.

A continuación se detallan los principios considerados en la evaluación de esta nueva función voraz.

a) Coeficiente ambiental (β_{amb})

Tal y como se describió en la sección 3.1.1, en este trabajo de investigación se propone incorporar la evaluación ambiental en términos de las emisiones de CO₂ generadas en la aplicación de los tratamientos de conservación. Concretamente, se propone incorporar este impacto a partir de un coeficiente ambiental (β_{amb}) que toma valores entre 0 y 1, siendo 0 la peor calificación ambiental posible. Este coeficiente penaliza la efectividad del programa de conservación (medida en términos de ABC), de forma que aquellas soluciones con mayor impacto ambiental, tengan una mayor penalización en su efectividad.

El coeficiente ambiental (β_{amb}), cuyo valor se obtiene de acuerdo a la Ecuación (5.2), evalúa la idoneidad ambiental de aplicar un tratamiento s_n de acuerdo a:

- Las emisiones generadas de aplicar el tratamiento en evaluación: CO_{2,s_n}

- Las emisiones máximas y mínimas generadas por las alternativas de conservación que podrían aplicarse al tramo en el año de evaluación: CO_{2max} y CO_{2min} , respectivamente.
- Un parámetro ambiental que controla la importancia de la evaluación ambiental y puede tomar valores entre 0 y 1: w_{amb}

$$\beta_{amb} = (1 - w_{amb}) \cdot \frac{CO_{2sn} - CO_{2min}}{CO_{2max} - CO_{2min}} + \frac{CO_{2max} - CO_{2sn}}{CO_{2max} - CO_{2min}} \quad (5.2)$$

Con $w_{amb} \in [0,1]$

Donde, β_{amb} es el coeficiente ambiental del tratamiento s_n ; w_{amb} es el parámetro ambiental; CO_{2sn} son las emisiones generadas de aplicar el tratamiento s_n ; CO_{2max} y CO_{2min} son, respectivamente, las emisiones máximas y mínimas generadas por las alternativas de conservación que podrían aplicarse al tramo n en evaluación.

La formulación propuesta para el coeficiente ambiental (β_{amb}) permite evaluar distintos escenarios cumpliendo las siguientes características:

- Si $CO_{2min} < CO_{2sn} < CO_{2max} \rightarrow \beta_{amb} \leq 1 \quad \forall w_{amb}$. Este caso representa el escenario general en el que el ABC de los tratamientos es penalizada proporcionalmente al impacto ambiental generado para cualquier valor del parámetro w_{amb} . El valor de esta penalización viene determinado por el coeficiente ambiental β_{amb} , el cual, a su vez, está controlado por el parámetro w_{amb} , que recoge el peso asignado a la evaluación ambiental.
- Si $w_{amb} = 0 \rightarrow \beta_{amb} = 1 \quad \forall s_n$. La consideración de un valor nulo del parámetro w_{amb} permite obviar el aspecto ambiental en la evaluación de alternativas.
- Si $CO_{2sn} = CO_{2min} \rightarrow \beta_{amb} = 1 \quad \forall w_{amb}$. Si, de entre todos los posibles tratamientos, se elige aquel que produce el menor impacto ambiental, el

valor del coeficiente ambiental toma el mayor valor posible independientemente del valor considerado del parámetro w_{amb} .

- Si $CO_{2sn} = CO_{2max} \rightarrow \beta_{amb} = 1 - w_{amb}$. Si, de entre todos los posibles tratamientos, se elige aquel que produce el mayor impacto ambiental, el valor del coeficiente ambiental se penaliza en base al parámetro w_{amb} . En el caso de considerar la máxima importancia posible al impacto ambiental ($w_{amb} = 1$), el valor del coeficiente ambiental del tratamiento más contaminante sería nulo.

La definición propuesta de la función voraz permite, además, obtener distintas familias de soluciones en función del valor del parámetro w_{amb} considerado en la evaluación del coeficiente ambiental ($\beta_{amb,sn}$, definido en la Ecuación (5.2)). Así, con una variación gradual del parámetro w_{amb} se buscará obtener, en la optimización multiobjetivo, una frontera de Pareto uniforme y continua.

b) Integración del algoritmo GLS

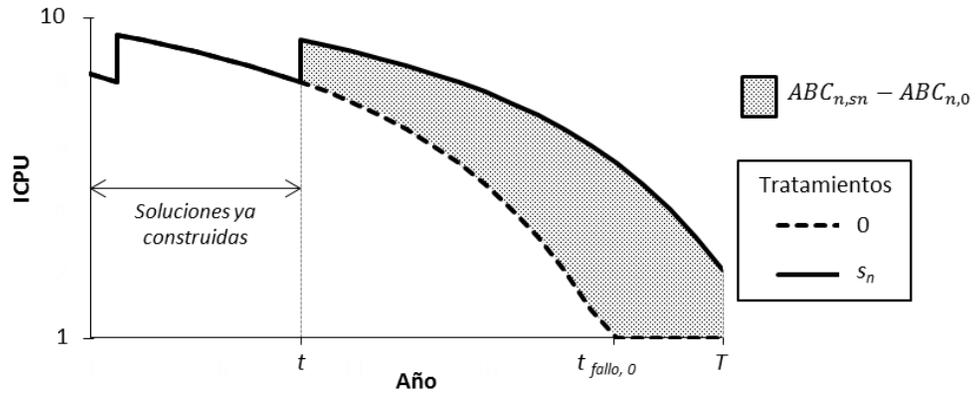
El segundo término de la nueva función voraz (Ecuación (5.1)) incorpora los principios de la búsqueda local guiada (GLS) penalizando aquellas soluciones que incumplen la restricción técnica antes de finalizar el periodo de análisis.

Por lo tanto, la característica de la solución (*solution feature*) considerada en el GLS consiste en el incumplimiento de la restricción técnica antes de finalizar el periodo de análisis. Esta característica se evalúa a partir de la función dicotómica de caracterización, la cual viene definida en la Ecuación (5.3). Esta función aumenta el valor de la función voraz de aquellos tramos que, en el caso de no ser tratados, alcanzarían un valor de $ICPU=1$ antes de finalizar el periodo de análisis.

$$I(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & t_{fallo, 0} \leq T \\ 0, & t_{fallo, 0} > T \end{cases} \quad (5.3)$$

Donde, $I(\mathbf{x})$ es la función dicotómica de caracterización de soluciones; $t_{fallo, 0}$ es el año en el cual el tramo en evaluación alcanza el valor de $ICPU=1$; y T es el periodo de análisis.

A modo de aclaración, en la Figura 5-1 se recoge una representación gráfica de los conceptos considerados en la función voraz propuesta en la Ecuación (5.1).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-1: Conceptos considerados en la función voraz con GRASP-GLS-GFB

c) Relajación de la restricción presupuestaria

El algoritmo híbrido propuesto considera, además, una relajación de la restricción presupuestaria en la construcción de soluciones. La nueva restricción presupuestaria, expresada en la Ecuación (5.4), viene controlada por el parámetro α , el cual se denominará a continuación parámetro de relajación presupuestaria.

$$g_{1,relajada} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \text{coste}(x_n) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \leq \alpha \cdot B(t); \quad \forall t \quad (5.4)$$

Donde t es el año de análisis (con $t \leq T$, siendo T el periodo de análisis); n es el tramo bajo análisis (con $n \leq N$, siendo N el número tramos en la red); $\text{coste}(x_n)$ es el coste del tratamiento x aplicado en el tramo n ; $\frac{1}{(1+i)^t}$ es el factor de actualización de costes para una tasa de descuento i en el año t ; $B(t)$ es el presupuesto disponible para tratar la red el año t ; y α es el parámetro de relajación presupuestaria.

Es importante señalar que esta relajación de la restricción presupuestaria se aplica, únicamente, en la fase de construcción. En la fase de mejora, se vuelve a la restricción inicial, de manera que las soluciones optimizadas cumplan la restricción presupuestaria inicial (no relajada).

5.1.2 Fase de mejora algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB

La solución obtenida en la fase de construcción es mejorada en un proceso basado en una búsqueda local. En base a los resultados obtenidos en la aplicación del algoritmo GRASP, se propone el GFB para el proceso de mejora de la solución construida. En esta mejora, la restricción presupuestaria vuelve a ajustarse a la real del problema (g_1 , definida en la Ecuación (3.6)).

La función objetivo se modifica mediante la incorporación del coeficiente ambiental (β_{amb}), incorporando así el aspecto ambiental en la evaluación de soluciones (Ecuación (5.5)). En este caso, el coeficiente ambiental (β_{amb}), compara las emisiones de los programas de conservación, otorgando el valor 1 al programa menos contaminante y el valor $1 - w_{amb}$ al programa que genera mayores emisiones de CO₂.

$$\max f(\mathbf{x}) = \max \sum_{n=1}^N \beta_{amb} \cdot ABC_n \quad (5.5)$$

Donde β_{amb} es el coeficiente ambiental; y ABC_n es la efectividad del programa de conservación aplicado en el tramo n (con $n \leq N$, siendo N el número tramos en la red).

5.1.3 Proceso del algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB

En base a estas consideraciones, el proceso se resume en los siguientes pasos:

1. *Repetir*: Pasos A - C para todos los años del periodo de análisis (desde $t = 1$ a T) para construir una población de programas de conservación que cumplan la restricción presupuestaria relajada $\rightarrow PC_{GRASP}$.
 - A. *Repetir*: Paso i para todas los tramos de la red (desde $n = 1$ a N):
 - i. *Repetir*: Pasos a y b para todos los tratamientos posibles para el tramo n en evaluación (desde $s_n = 1$ a S_n):

- a. *Evaluar*: Efecto de aplicar el tratamiento $s_n \rightarrow ABC_{n,s_n}, ABC_{n,0}$ y $t_{fallo, 0}$
 - b. *Evaluar*: Función voraz $\rightarrow GF_{n,s_n}$
- B. *Ordenar*: Establecer un listado ordenado de los posibles tratamientos para todos los tramos de la red en base al valor de la función voraz.
- C. *Seleccionar*: Tratamientos y tramos candidatos en base a la función de probabilidad hasta que agotar presupuesto disponible en el año t .
2. *Búsqueda local*: Mejora de la solución construida mediante una búsqueda local basada en GFB que considera la restricción presupuestaria inicial $\rightarrow PC_{GFB}$
- A. *Repetir*: Pasos B - D para cada programa de conservación de la población construida de soluciones $PC_{GRASP,i}$ (donde $PC_{GRASP,i} \in PC_{GRASP}$).
 - B. *Fijar*: La solución construida como solución inicial para la búsqueda GFB $PC_{GFB,i} \leftarrow PC_{GRASP,i}$
 - C. *Seleccionar*:
 - i. Tipo de movimiento (HX).
 - ii. Criterio de parada definido como máximo de iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$).
 - D. *Repetir*: Pasos i – iiiii mientras no se cumpla el criterio de parada (de $n_{iter sm} = 1$ a $N_{itersm max}$):
 - i. Modificar la solución inicial (PC_{GFB}) mediante la variación del valor de las variables $\rightarrow PC'_{GFB}$
 - ii. Calcular la variación obtenida en la función objetivo definida en la Ecuación (5.5) $\rightarrow \Delta f = f(PC_{GFB}) - f(PC'_{GFB})$
 - iii. Si $\Delta f > 0$, aceptar la solución como nueva solución: $PC_{GFB,i} \leftarrow PC'_{GFB}$
3. *Seleccionar*: La solución óptima de la familia de soluciones $\rightarrow PC_{GRASP-GLS-GFB}$ (donde $PC_{GRASP-GLS-GFB} \in PC_{GFB}$).

5.2 Calibración del Algoritmo Híbrido Propuesto

De forma similar a los algoritmos heurísticos aplicados en el capítulo 4, la aplicación del método híbrido GRASP-GLS-GFB requiere la calibración de sus parámetros. En esta sección se presenta el diseño experimental considerado en esta calibración así como los resultados obtenidos de este proceso.

5.2.1 Diseño experimental para la calibración

La calibración del algoritmo híbrido se realizó en tres fases:

- En la primera fase se calibró el parámetro λ que controla la importancia de la función de penalización en el algoritmo GLS. Para ello, se analizaron las soluciones resultantes de la fase de construcción, considerando distintos niveles del parámetro λ . En todos los casos, se consideró una construcción determinista de soluciones ($\eta = 0$) y un valor nulo del parámetro ambiental (w_{amb}). Concretamente, se analizaron tres niveles del parámetro λ : 0, 50 y 100 (Figura 5-2). El primero de los niveles simula los resultados obtenidos en el caso de no considerar el algoritmo híbrido, mientras que los otros dos consideran distintos niveles de importancia de la función de penalización.

λ		
0	50	100
$N_{iter}, f(x_{opt})$	$N_{iter}, f(x_{opt})$	$N_{iter}, f(x_{opt})$

FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-2: Factorial de calibración parámetro de penalización en GLS

- En la segunda fase se calibró el parámetro probabilístico (η), que controla la función de probabilidad en la construcción de soluciones del algoritmo GRASP, y los parámetros del GFB empleados en la fase de mejora. Para esta calibración se consideraron los mismos niveles ensayados en la calibración del algoritmo GRASP (Figura 3-18).
- Finalmente, en la tercera fase, se calibró el parámetro α que controla la relajación presupuestaria en la fase de construcción GRASP. En este caso, se analizaron 11 niveles con modificación del presupuesto entre 0,75 y 1,25 considerando incrementos de 0,05 (Figura 5-3).

α	
1,25	$N_{iter}, f(x_{opt})$
...	...
1,05	$N_{iter}, f(x_{opt})$
1,00	$N_{iter}, f(x_{opt})$
0,95	$N_{iter}, f(x_{opt})$
...	...
0,75	$N_{iter}, f(x_{opt})$

FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-3: Factorial de calibración del parámetro de relajación presupuestaria

5.2.2 Resultados de la calibración

En base a los resultados obtenidos en la calibración del parámetro λ (Tabla 5-1), se concluye que el algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB ($\lambda > 0$) permite construir mejores soluciones que las obtenidas con el algoritmo clásico GRASP ($\lambda = 0$). De hecho, la construcción de soluciones con el método híbrido con $\lambda = 100$ (solución sombreada en la Tabla 5-1 obtiene soluciones factibles (que no tienen, por tanto, penalización) mientras que el algoritmo clásico no es capaz de construir una solución factible del problema.

Tabla 5-1: Calibración del parámetro λ del algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB

λ	N_{iter}	ABC_{max}	Penalización	Emisiones CO_2
0	3.800	3.917	199.433	1.117.958
50	3.800	3.827	92.206	1.207.295
100	3.800	4.599	0	605.880

FUENTE: Elaboración propia

En la segunda fase de la calibración, los resultados obtenidos muestran cómo la selección aleatorizada de candidatos ($\eta > 0$) presenta un valor promedio de efectividad máxima ($\overline{ABC_{max}}$) inferior al obtenido con un procedimiento determinista ($\eta = 0$), si bien la mejor de las soluciones encontradas de forma aleatorizada supera la efectividad máxima (ABC_{max}) obtenida con el procedimiento determinista (Tabla 5-2).

Tabla 5-2: Calibración del parámetro probabilístico y GFB del algoritmo híbrido

	η			
	0,00	0,10	0,25	0,50
ABC_{max}	3.906	3.912	-13.427	-18.599
Penalización	0	0	17.753	23.056
$N_{iteraciones}$	100	3.651	19.727	24.422
\overline{ABC}_{max}	-	-16.797	-49.786	-92.723
$\sigma_{ABC_{max}}$	-	8.730	42.875	73.048
Movimiento GFB	H50	H5	H5	H5
$N_{itersm,max\ GFB}$	100	1.000	1.000	1.000

FUENTE: Elaboración propia

La mejor solución obtenida corresponde con $\eta = 0,10$ y una búsqueda local con GFB con un movimiento H5 y un criterio de parada de 1.000 iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$) (solución sombreada en la Tabla 5-2). En el Anexo I se recoge en detalle los resultados obtenidos en la calibración. Es importante mencionar que, puesto que la solución óptima se alcanzó para ($N_{itersm,max} = 1.000$) y este fue el nivel máximo analizado para este factor, se amplió el estudio considerando 5.000 iteraciones sin mejora como criterio de parada. Sin embargo, esta ejecución necesitó 80 horas de

ejecución (frente a las 16 horas necesitadas por la ejecución con $N_{itersm,max} = 1.000$) y supuso un incremento del 0,60% del ABC_{max} . Es por esto que se mantuvo como calibración óptima el valor ensayado inicialmente.

Así mismo cabe mencionar que la heurística híbrida GRASP-GLS-GFB se aplicó también con una búsqueda local basada en TA considerando los valores de los parámetros calibrados anteriormente ($\eta = 0,10$, movimiento H5 y criterio de parada de 1.000 iteraciones sin mejora ($N_{itersm,max}$)). Sin embargo, de forma similar a la ocurrida con la heurística GRASP, la búsqueda local con TA resulta en soluciones no factibles. Esto parece deberse a que la factibilidad de las soluciones construidas es muy frágil, resultando en peores soluciones tras el post-proceso de búsqueda local con TA. Dada la naturaleza de la búsqueda TA y sus similitudes con el SA, es esperable los resultados al aplicar este último como búsqueda local sean similares.

Finalmente, en la tercera fase de calibración se definió el valor óptimo del parámetro de relajación presupuestaria para la construcción de soluciones (α). En base a los resultados obtenidos (Tabla 5-3), el algoritmo resulta en programas más efectivos cuando considera una limitación presupuestaria 5% superior a la real en la fase de construcción de soluciones (solución sombreada en la Tabla 5-3).

Tabla 5-3: Calibración del parámetro de relajación presupuestaria

α	$N_{iteraciones}$	ABC_{max}	Penalización	\overline{ABC}_{max}	$\sigma_{ABC_{max}}$
1,25	19.873	-13.865	18.291	-23.428	5.604
1,20	21.008	-15.802	20.236	-24.778	5.439
1,15	22.500	-18.306	22.712	-23.508	3.791

α	$N_{iteraciones}$	ABC_{max}	Penalización	\overline{ABC}_{max}	$\sigma_{ABC_{max}}$
1,10	23.316	-13.301	17.703	-24.621	7.568
1,05	3.972	3.916	0	-19.665	6.755
1,00	3.651	3.912	0	-16.797	8.730
0,95	13.510	-8.422	12.641	-47.448	27.378
0,90	13.073	-88.190	92.206	-107.505	18.071
0,85	11.260	-93.189	97.257	-107.515	10.917
0,80	17.482	-98.183	102.492	-112.014	7.750
0,75	22.251	-183.497	187.600	-189.938	4.782

FUENTE: Elaboración propia

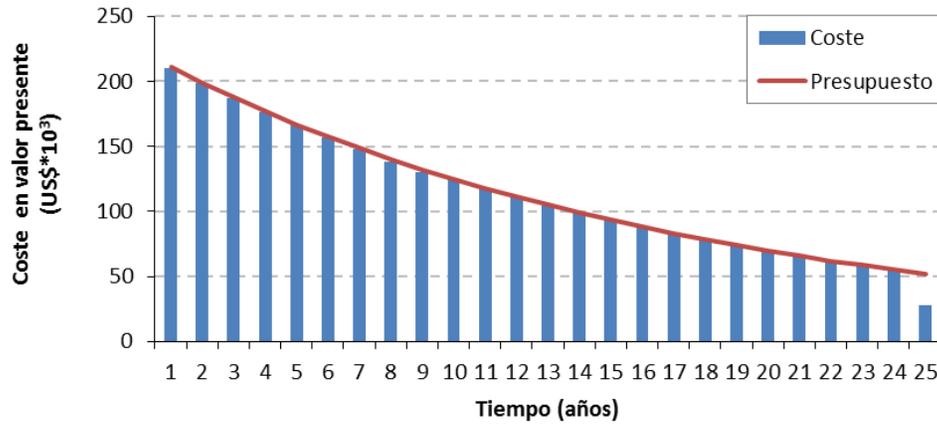
Teniendo en cuenta estos parámetros, la solución óptima obtenida con el algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB tiene las características presentadas en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Características de la solución óptima con GRASP-GLS-GFB

Presupuesto [US\$]	2.855.720
Coste [US\$]	2.820.572
ABC_{max} [ICPU·años]	3.916
Penalización [ICPU·años]	0
ABC_{max} Penalizada [ICPU·años]	3.916
Número iteraciones [ud]	3.972
\overline{ABC}_{max}	-19.665
$\sigma_{ABC_{max}}$	6.755
Emisiones [kg CO2]	1.127.480

FUENTE: Elaboración propia

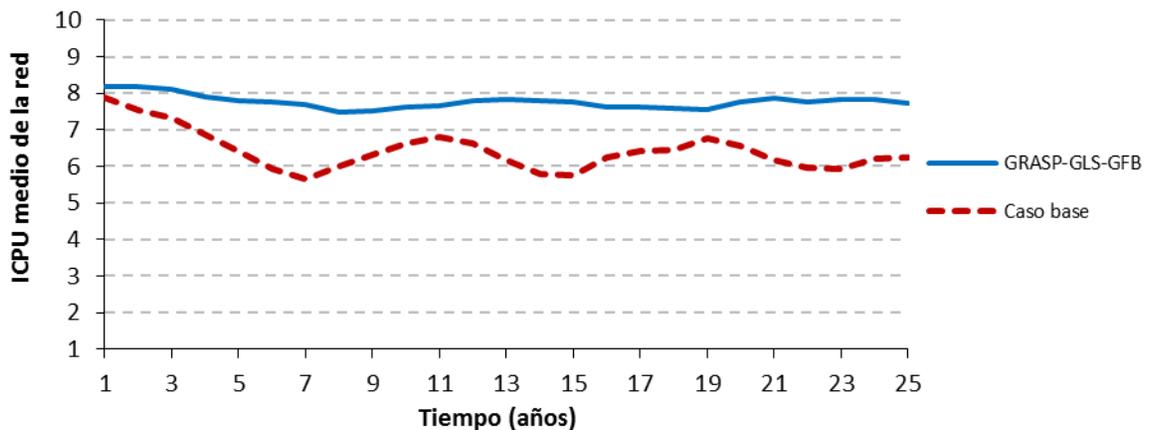
Puesto que el programa diseñado con el algoritmo híbrido es una solución factible del problema, su coste no supera, en ningún año, el presupuesto disponible (Figura 5-4).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-4: Flujo de costes anuales del programa óptimo GRASP-GLS-GFB

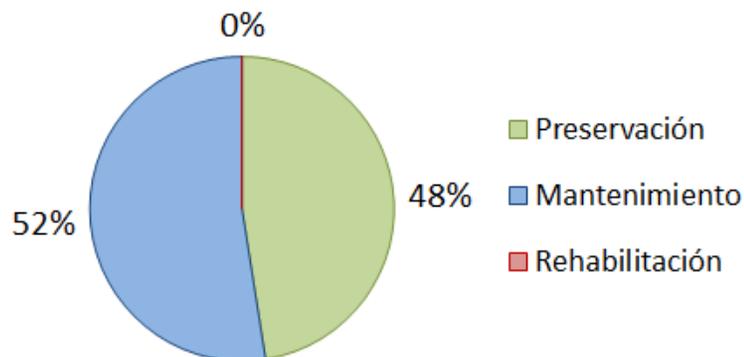
En términos de condición, el programa óptimo diseñado con el algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB permite aumentar en un 21% la condición media de la red a lo largo del periodo de análisis (Figura 5-5); cumpliendo, a su vez, las restricciones técnicas y económicas del problema. El aumento en condición obtenido con el algoritmo híbrido permite mantener la condición promedio de la red en valores prácticamente constantes a lo largo del periodo de análisis.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-5: Condición media de la red con GRASP-GLS-GFB y caso base

En relación a los tratamientos empleados, la heurística híbrida GRASP-GLS-GFB aplica tanto tratamientos de preservación como de mantenimiento (Figura 5-6). Al comparar estos tratamientos con los obtenidos en los programas diseñados con los algoritmos clásicos (Figura 4-10, Figura 4-13, Figura 4-17 y Figura 4-20) se observa que el algoritmo híbrido considera más tratamientos de mantenimiento que los aplicados en los algoritmos simples. El algoritmo híbrido permite, por tanto, diseñar programas de conservación con costes más ajustados durante los primeros años de análisis y programar, de forma más ordenada a lo largo del periodo de análisis, la conservación de todos los tramos de la red.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-6: Tipos de tratamiento en el programa óptimo con GRASP-GLS-GFB

Los tratamientos de preservación principalmente aplicados son los riegos de neblina y las lechadas asfálticas en pavimentos de asfalto; así como el cepillado en pavimentos de hormigón. Por su parte, los tratamientos de mantenimiento se basan, para ambos tipos de pavimentos, en recrecidos estructurales.

5.3 Validación del Algoritmo Híbrido

Una vez calibrado el algoritmo híbrido, se lleva a cabo su validación mediante la comparación, para distintos escenarios, de los programas de conservación obtenidos con el algoritmo clásico más adecuado (GRASP) y el algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB propuesto.

5.3.1 Diseño experimental para la validación del algoritmo híbrido propuesto

Los escenarios analizados para la validación recogen distintas configuraciones iniciales de la red presentada en el capítulo 4. Estos escenarios no se corresponden necesariamente con una configuración real, sino que han sido diseñados para reflejar distintas redes de estudio, de forma que el algoritmo propuesto sea validado bajo distintos escenarios. Concretamente, los casos analizados representan redes con distinta condición inicial, tipos de pavimento y jerarquía mayoritaria de la red. A continuación se describen los niveles analizados de estos factores:

- Condición inicial: Se analizaron cuatro niveles de condición inicial de la red, evaluada en términos de condición cualitativa media: red mayoritariamente en buen estado (con más del 50% de su longitud con una condición por encima de $ICPU=7$); red en condición regular (con más del 50% de su longitud con una condición en términos de $ICPU$ entre 7 y 5); red mayoritariamente en mal estado (con más del 50% de su longitud con una condición en términos de $ICPU$ entre 5 y 3,5); y red uniforme (con aproximadamente un 20% de la red en cada uno de los rangos descritos anteriormente).

- Tipo de pavimento: Se analizaron redes con distintos tipos de pavimento, expresado por el porcentaje de km de la red con pavimentos de asfalto (el porcentaje complementario al analizado corresponde a pavimentos de hormigón): 100%, 75%, 50%, 25% y 0% asfalto.
- Jerarquía: Se analizaron tres niveles de este factor, el cual recoge el porcentaje de longitud de la red que pertenece a la red estructurante (el porcentaje complementario analizado corresponde a pavimentos de la red secundaria): mayoritariamente red estructurante (más del 50% de la longitud de la red perteneciente a la red estructurante, identificada con la sigla E), mayoritariamente red secundaria (en este caso, identificado con la sigla S, menos del 50% de la longitud de la red pertenece a la estructurante) y uniforme (caso identificado con las siglas E-S, donde aproximadamente el 50% de la longitud de la red pertenece a la red estructurante).

En base a estas consideraciones, el diseño experimental propuesto para validar el algoritmo híbrido propuesto es el representado en la Figura 5-7. Así mismo, en el Anexo J se recogen los datos de inventario de los distintos escenarios analizados.

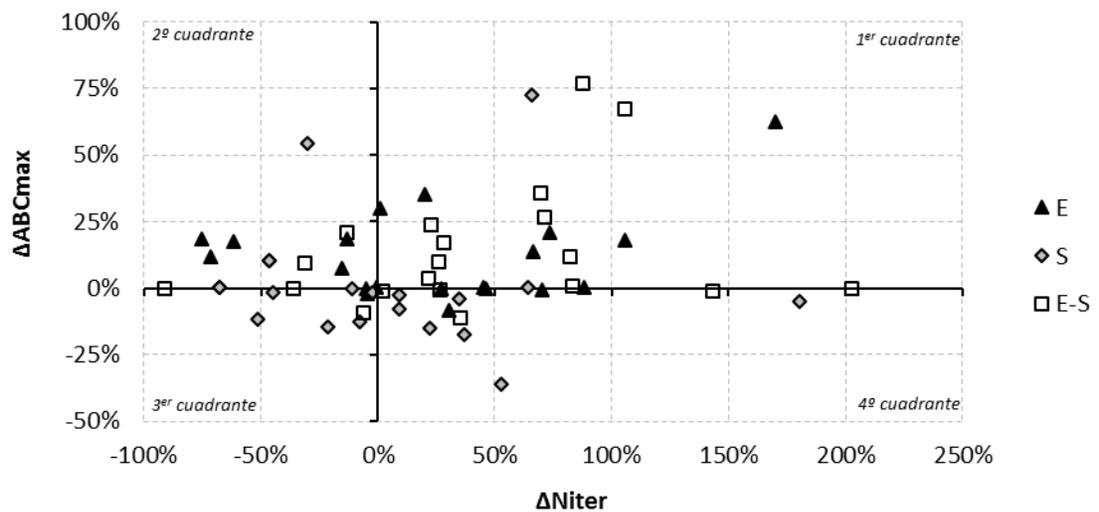
		Jerarquía E-S: = 50% Red estructurante							
		Jerarquía S: < 50% Red estructurante							
		Tipo pavimento							
		Jerarquía E: > 50% Red estructurante	100% Asfalto	75% Asfalto	50% Asfalto	25% Asfalto	0% Asfalto		
Condición inicial red	Buena	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}
	Regular	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}
	Mala	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}
	Uniforme	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}	ΔABC_{max}	ΔN_{iter}

FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-7: Diseño experimental para la validación del algoritmo híbrido

5.3.2 Resultados de la validación del algoritmo híbrido propuesto

En términos medios, el algoritmo híbrido resulta en programas de conservación con una efectividad 9% superior a la obtenida con el algoritmo clásico más eficaz requiriendo, en el 57% de los escenarios analizados, un esfuerzo de computación inferior. Se puede, por tanto, concluir que, en la mayoría de escenarios analizados, el algoritmo híbrido propuesto resulta en soluciones más efectivas que los algoritmos analizados en el capítulo 4 requiriendo, para ello, un esfuerzo computacional menor.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-8: Resultados de la validación de la heurística híbrida

Para un análisis más detallado de los resultados obtenidos en el proceso de validación, la Figura 5-8 recoge las mejoras (en términos de efectividad y número de iteraciones) de las soluciones óptimas obtenidas con el algoritmo híbrido GRASP-GLS-GFB y el algoritmo clásico GRASP. Los casos en los que el algoritmo híbrido propuesto ha diseñado programas de conservación con mayor efectividad que el algoritmo clásico GRASP quedan representados en el primer y segundo cuadrante de

la Figura 5-8 (ya que obtienen un $\Delta ABC_{max} > 0$). De manera análoga, los escenarios que han requerido un menor esfuerzo computacional con el algoritmo híbrido, quedan representados en el segundo y tercer cuadrante (ya que obtienen un $\Delta N_{iter} < 0$). El detalle de los resultados se recoge en el Anexo J.

En términos técnicos, los mayores aumentos de efectividad (que llegan a mejorar en un 77% el ABC_{max}) se producen en redes uniformes, con tramos tanto de la red estructural como secundaria (identificados con la leyenda E-S en la Figura 5-8), con una condición inicial buena y pavimentos mayoritariamente de hormigón. En estos casos, sin embargo, se requieren tiempos de computación sensiblemente mayores a los empleados por el algoritmo clásico GRASP.

En términos computacionales, los principales ahorros (que alcanzan valores del 91% en términos del número de iteraciones) se dan también en redes uniformes con buena condición pero, en este caso, con pavimentos tanto de asfalto como de hormigón.

Por el contrario, los escenarios en los que el algoritmo híbrido resulta menos eficiente (en términos técnicos y computacionales) se corresponden con redes en las que la mayoría de tramos pertenecen a la red secundaria (identificados con la leyenda S en la Figura 5-8). En estos casos, se identifican incluso siete escenarios en los que el algoritmo híbrido resulta en soluciones con menor efectividad y mayor número de iteraciones que el algoritmo clásico GRASP. La ineficiencia del algoritmo híbrido en estos escenarios se debe, fundamentalmente, al limitado número de alternativas de conservación disponibles para la conservación de tramos de la red secundaria (Tabla

4-2). En estos casos, la capacidad para explorar el espacio de soluciones es muy limitada, por lo que la solución óptima depende, en gran medida, de la primera solución generada. Estos casos refuerzan la evidencia detectada en la sección 4.4, en la que se concluyó que la eficiencia de los algoritmos heurísticos basados en búsquedas locales está determinada por la capacidad que tienen estos de explorar el espacio de soluciones de manera continua o con pequeños movimientos.

5.4 Optimización Multiobjetivo

Una vez validada la herramienta de optimización y tras concluir que la heurística híbrida propuesta permite una gestión más eficiente en términos técnicos, económicos y computacionales que las heurísticas clásicas analizadas en el capítulo 4, en esta sección se analizan las ventajas ambientales derivadas del uso de la heurística híbrida. Para ello se lleva a cabo una optimización multiobjetivo en la que, además de maximizar la efectividad, se busca minimizar el impacto ambiental generado por las actividades de conservación.

Puesto que la función voraz propuesta en esta investigación para la construcción de soluciones (Ecuación (5.1)) integra los aspectos técnicos y ambientales, se propone explorar el espacio de soluciones biobjetivo mediante una variación paramétrica del parámetro ambiental (w_{amb}). De acuerdo a las aplicaciones revisadas en la sección 2.2.2, este enfoque es uno de los métodos más utilizados en la gestión de infraestructura vial para definir la frontera de Pareto en los problemas de

optimización multiobjetivo (Wu y Flintsch 2009; Wu et al. 2012; Meneses y Ferreira 2013, 2015).

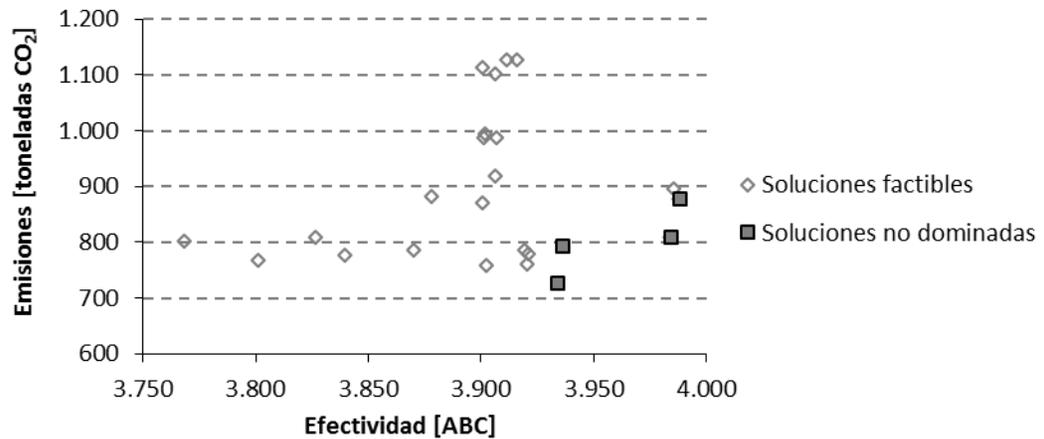
De acuerdo a la distinción de métodos de decisión multicriterio definidos en la sección 2.2.2, esta aplicación considera, por tanto, una definición a posteriori de preferencias. De esta forma, no es necesario establecer la importancia relativa entre los objetivos antes del proceso de optimización. Por el contrario, con este enfoque, la optimización genera un conjunto de alternativas eficientes en base a las cuales el decisor elige una de las soluciones propuestas. Es en el momento de elegir la alternativa a implementar cuando el tomador de decisión define sus preferencias.

Este enfoque presenta la ventaja de proveer una frontera de Pareto de soluciones no dominadas, de forma que el tomador de decisión pueda finalmente escoger entre estas soluciones definiendo así la preferencia relativa entre los objetivos considerados. Este enfoque, además, es el principalmente empleado en la optimización multiobjetivo con GRASP (Martí et al. 2015) y ha resultado exitoso en estudios previos de optimización aplicados a la gestión de pavimentos (Gabriel et al. 2006; Wu y Flintsch 2009; Gao et al. 2012).

5.4.1 Resultados de la optimización multiobjetivo

El conjunto de soluciones factibles obtenidas en la aplicación multiobjetivo se presenta en la Figura 5-9. Estas soluciones se han obtenido con una variación del parámetro ambiental (w_{amb}) entre 0 y 1 con incrementos de 0,05. Para cada valor del

parámetro ambiental, la heurística híbrida GRASP-GLS-GFB ha diseñado 25 programas de conservación obteniendo, por tanto, un total de 525 soluciones.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-9: Familia de soluciones resultantes de la aplicación multiobjetivo

A la vista de los resultados mostrados en la Figura 5-9 se constata que los objetivos analizados (efectividad y emisiones) son objetivos en conflicto. De hecho, resulta difícil mejorar uno de ellos sin generar un impacto negativo en el otro. Así, mayores niveles de efectividad implican un aumento en las emisiones generadas, mientras que una gestión más respetuosa con el medioambiente implica una reducción en el nivel de servicio de la red.

De las soluciones obtenidas, se identifican cuatro soluciones óptimas no dominadas que definen la frontera de Pareto (Figura 5-9). El elevado número de soluciones analizadas (525) contrastan con el reducido número (4) de soluciones no dominadas. Esta reducción se debe, principalmente, a dos factores.

Por una parte, la consideración del impacto ambiental en la optimización multiobjetivo complica el proceso de búsqueda de soluciones factibles, siendo computacionalmente más costoso encontrar soluciones que cumplan las restricciones del problema. De hecho, sólo un 5% de las 525 soluciones obtenidas en el proceso de optimización resultaron factibles.

Por otra parte, esta aplicación pone en evidencia una de las limitaciones de los métodos de optimización multiobjetivo basados en una suma ponderada: cuando las funciones objetivo no son lineales, la variación continua y consistente de pesos no garantiza que se encuentre una frontera de Pareto uniforme. De hecho, el número de soluciones no dominadas viene principalmente determinado por el incremento considerado en la variación del peso entre objetivos (el cual corresponde, en este caso, a la variación del parámetro ambiental w_{amb}). Así, una variación menor del parámetro ambiental (w_{amb}) con incrementos, por ejemplo, de 0,01 en lugar de 0,05; es probable que permita identificar soluciones no dominadas adicionales a las presentadas en la frontera de Pareto de la Figura 5-9. A cambio, este análisis precisaría la evaluación de un total de 2.525 soluciones (frente a las 525 evaluadas con un incremento de 0,05). Es necesario, por tanto, encontrar una solución de compromiso entre el esfuerzo computacional necesario para definir el conjunto de soluciones no dominadas; y la necesidad, por parte del tomador de decisión, de disponer de un conjunto más o menos continuo de soluciones factibles. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se analizan a continuación las características de algunas de las soluciones óptimas no dominadas.

5.4.2 Definición de preferencias entre los objetivos considerados

De acuerdo a la sección 2.2.2, existen distintos métodos para seleccionar una de las soluciones no dominadas como solución óptima del problema multiobjetivo. Dado que el enfoque utilizado en este estudio ha considerado una función ponderada de los objetivos, parece especialmente adecuado el uso de un método de programación por compromiso. En este método, la idoneidad de las soluciones no dominadas se evalúa a partir de la distancia a una solución ideal (la cual estaría representada, en valores normalizados, por el punto (1,1) mostrado en la Figura 5-10). A diferencia de otros métodos disponibles tales como la suma ponderada o el AHP, la programación por compromiso presenta la ventaja de no necesitar definir pesos relativos entre los objetivos, resultando así en una selección más objetiva de la solución óptima.

Tabla 5-5: Soluciones óptimas no dominadas

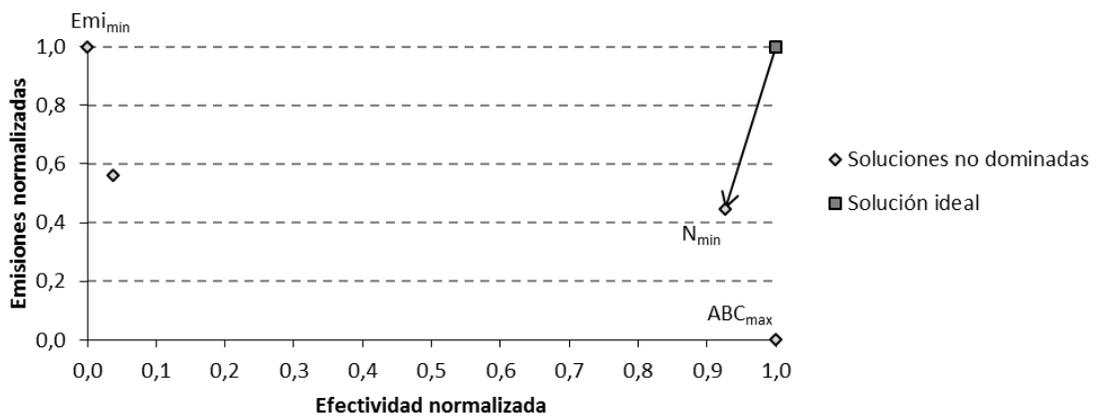
ID	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]	w_{amb}	ABC normalizada	Emisiones normalizadas	N
1 (ABC _{max})	3.988	877.399	0,20	1,00	0,00	1,00
2 (N _{min})	3.984	809.855	0,30	0,93	0,44	0,56
3	3.936	792.349	0,40	0,04	0,56	1,06
4 (EMI _{min})	3.934	725.464	0,70	0,00	1,00	1,00

NOTA: N es la distancia euclídea a la solución ideal, calculada a partir de la Ecuación (2.7)

FUENTE: Elaboración propia

En base a estas consideraciones, en la Tabla 5-5 se recoge el valor normalizado de las funciones objetivo obtenido por cada una de las soluciones no dominadas. Estos valores normalizados, obtenidos de acuerdo a la formulación presentada en las Ecuaciones (2.4) y (2.5) , permiten comparar en una escala común el valor de las funciones objetivo, otorgando el valor 1 a la solución más conveniente (con menor

cantidad de emisiones y mayor efectividad) y el valor 0 a la solución menos conveniente (con mayor cantidad de emisiones y menor efectividad). De esta manera, la solución óptima con menor distancia euclídea a la solución ideal (N_{\min}) es la obtenida con un valor del parámetro ambiental $w_{amb} = 0,30$ (Figura 5-10). En la Figura 5-10 se identifican también la solución con menores emisiones (EMI_{\min}) y la de mayor efectividad (ABC_{\max}).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-10: Soluciones óptimas no dominadas

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5-5, se observa que todas las soluciones óptimas no dominadas obtenidas en la aplicación multiobjetivo son diseñadas con un valor no nulo del parámetro ambiental (w_{amb}). Se puede, por tanto, concluir que el indicador ambiental propuesto (β_{amb}) mejora, en términos técnicos y ambientales, el diseño de programas de conservación.

Es más, a la vista de estos resultados (Tabla 5-5) se puede incluso concluir que la herramienta de optimización multiobjetivo propuesta permite diseñar programas de conservación más sostenibles que el obtenido en la aplicación monobjetivo (Tabla

5-4). Estos programas son más sostenibles porque, no sólo se reduce el impacto ambiental entre un 22 y un 36%, sino que además, la efectividad aumenta entre un 0,5 y un 1,8%. En las próximas secciones se presenta un análisis más detallado de las soluciones no dominadas obtenidas en la optimización multiobjetivo.

5.4.3 Análisis de las soluciones óptimas

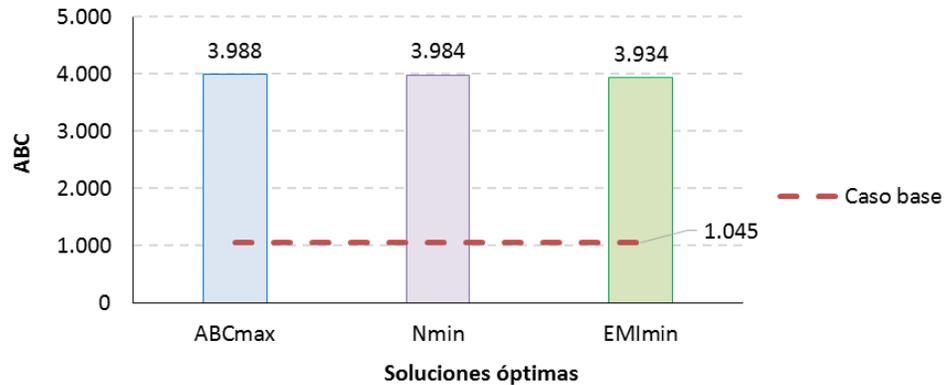
En esta sección se analizan las soluciones óptimas extremas (entendiendo como tal las soluciones con mayor efectividad y menores emisiones, ABC_{max} y EMI_{min} , respectivamente) y la solución con menor distancia euclídea (N_{min}). Para una mayor simplicidad en la explicación, esta última solución será denominada como solución recomendada, ya que resulta una solución de compromiso entre los objetivos técnicos y ambientales considerados en la optimización multiobjetivo. Sin embargo, es importante mencionar que la administración responsable de la gestión de esta red podría elegir, en función a los objetivos de su gestión, cualquier otra de las soluciones no dominadas obtenidas en la optimización. Teniendo en cuenta este aspecto, en la Tabla 5-6 se recogen las características de estas soluciones.

Tabla 5-6: Características de las soluciones óptimas en la aplicación multiobjetivo

	ABC_{max}	N_{min}	EMI_{min}
Presupuesto [US\$]		2.855.720	
Coste [US\$]	2.797.610	2.800.450	2.774.540
ABC_{max} [ICPU·años]	3.988	3.984	3.934
Penalización [ICPU·años]	0	0	0
ABC_{max} Penalizada [ICPU·años]	3.988	3.984	3.934

Número iteraciones [ud]	28.653	14.139	17.214
Emisiones [kg CO ₂]	877.399	809.855	725.464

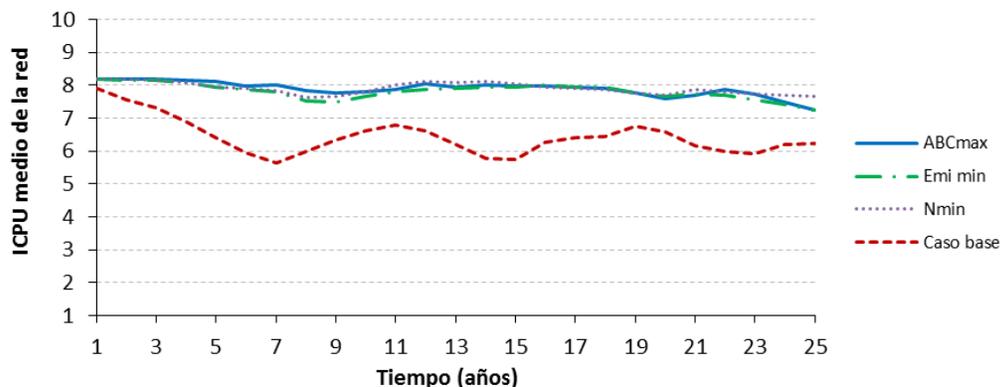
FUENTE: Elaboración propia



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-11: Efectividad de los programas óptimos multiobjetivo y el caso base

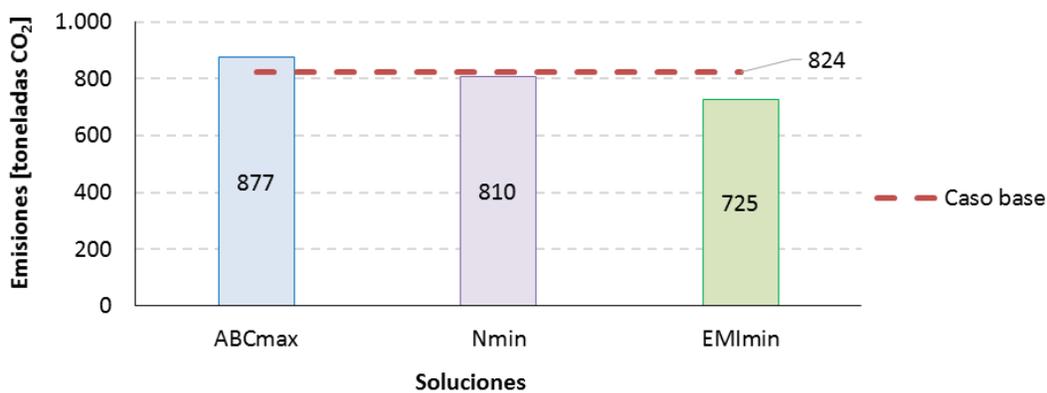
En términos de efectividad, las soluciones óptimas llegan casi a cuadruplicar el ABC obtenido con el caso base (Figura 5-11). Puesto que este indicador es muy sensible a las variaciones en la condición de la red, puede resultar más intuitivo analizar la mejora en términos de condición media de la red. Así, en términos de ICPU, las soluciones óptimas aumentan en un 22% la condición media de la red en el periodo de análisis. Esta mejora permite mantener, a lo largo del periodo de análisis, un valor promedio de condición de la red similar a la condición de partida (ICPU = 7,9). De hecho, las tres soluciones optimizadas presentan niveles similares de condición media, con valores por encima de 7 (en términos de ICPU) a lo largo del periodo de análisis (Figura 5-12).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-12: Condición media de la red de programas óptimos y caso base

En términos ambientales, la solución de mínimas emisiones (EMI_{min}) reduce el impacto ambiental en un 12% respecto al caso base (Figura 5-13). Al comparar esta solución con la de máxima efectividad (ABC_{max}), la reducción de emisiones llega a ser del 21%; si bien esta mejora genera un decremento en la efectividad del 1%.

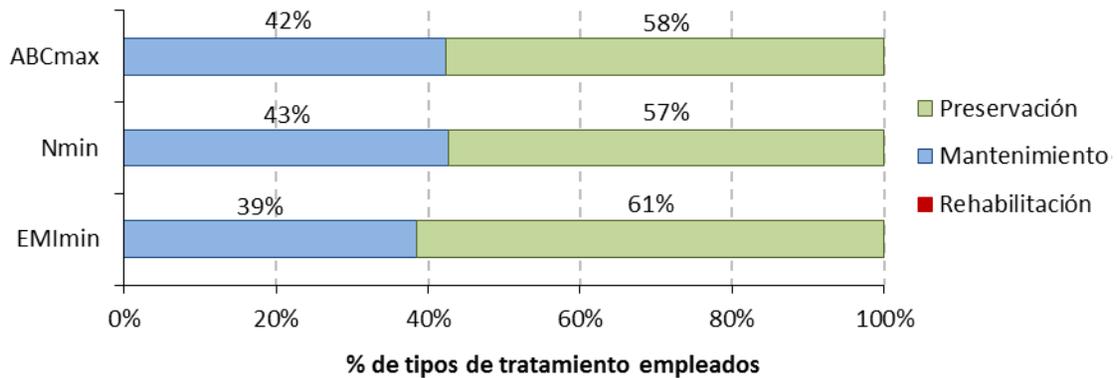


FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-13: Emisiones de los programas óptimos multiobjetivo y el caso base

Del análisis del tipo de tratamiento empleado se concluye que los tratamientos de rehabilitación resultan poco sostenibles (en términos de efectividad y emisiones), ya que no están incluidos en ninguno de los programas de conservación óptimos (Figura

5-14). También se observa que los programas óptimos se basan en una conservación proactiva de la red en la que se aplican tratamientos de preservación cuando la condición de los pavimentos aún es buena (Figura 5-14).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-14: Tipo de tratamiento empleado en los programas óptimos

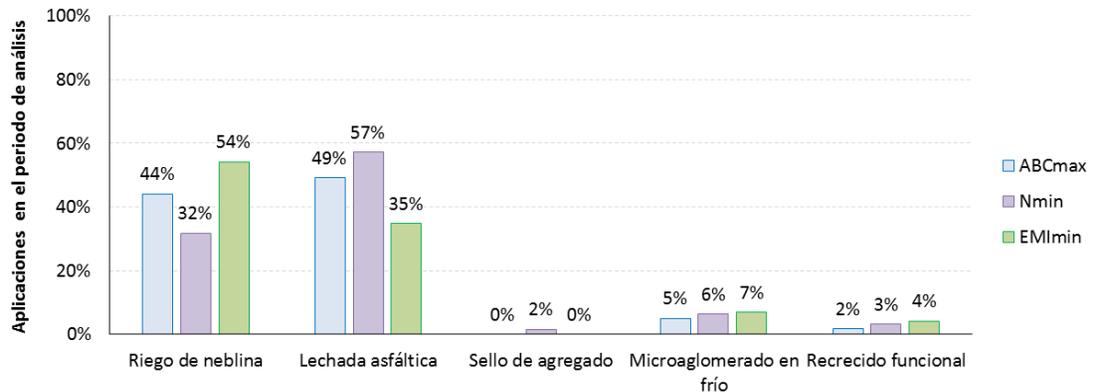
A continuación se presenta un análisis más detallado de los tratamientos utilizados en los programas óptimos para pavimentos de asfalto y hormigón. A la hora de analizar los tratamientos considerados en los programas de conservación optimizados es importante tener en cuenta que, tal y como se detalló en la sección 4.2.2, los tratamientos considerados en la optimización son efectivos para tratar distintos tipos de deterioro. Si bien se han definido unos umbrales de aplicación de cada tratamiento en términos de ICPU, que garantiza que la herramienta haga una propuesta coherente de tratamientos en función del nivel de deterioro del pavimento, se han de tener en cuenta las limitaciones existentes de un análisis a nivel de red. Así, tal y como se introdujo en la sección 1.1.2, el análisis a nivel de red empleado en esta investigación utiliza información agregada de forma que, al basarse en un indicador compuesto de

condición, no es posible estimar los deterioros específicos presentes en cada tramo de la red. Es por esto que, la aplicación final de los tratamientos propuestos por la herramienta requiere de un estudio en detalle, propio de una gestión a nivel de proyecto, que evalúe los deterioros específicos existentes en la sección a tratar verificando así la idoneidad del tratamiento propuesto. Teniendo en cuenta estas limitaciones, se analizan a continuación los tratamientos considerados en los programas óptimos de conservación.

En el caso de pavimentos de asfalto, se analizan únicamente los tratamientos aplicados en la red estructurante, ya que estos tienen varias alternativas de tratamiento en las categorías de preservación y mantenimiento (Tabla 4-2). Los tratamientos aplicados en la red secundaria se excluyen de este análisis porque estos pavimentos no cuentan con alternativas, existiendo un único tratamiento aplicable en la categoría de preservación y mantenimiento (Tabla 4-2).

En base a estas consideraciones, se observa que los tratamientos de preservación mayoritariamente empleados en pavimentos de asfalto son la lechada asfáltica y el riego de neblina; siendo este último especialmente empleado en el programa de menor impacto ambiental (EMI_{\min}) (Figura 5-15). Dentro de la categoría de preservación, el riego de neblina y la lechada asfáltica son los tratamientos menos intensivos de entre los considerados en este estudio. De hecho, de acuerdo con los valores considerados en este estudio (Tabla 4-3), los umbrales de condición mínimos para los que pueden aplicarse estos tratamientos, son especialmente altos ($ICPU \geq 8,5$ en el caso del riego de neblina e $ICPU \geq 7,5$ en el de lechada asfáltica). Por lo tanto,

este análisis ratifica la conclusión derivada anteriormente: los programas de conservación óptimos se basan en una conservación proactiva.

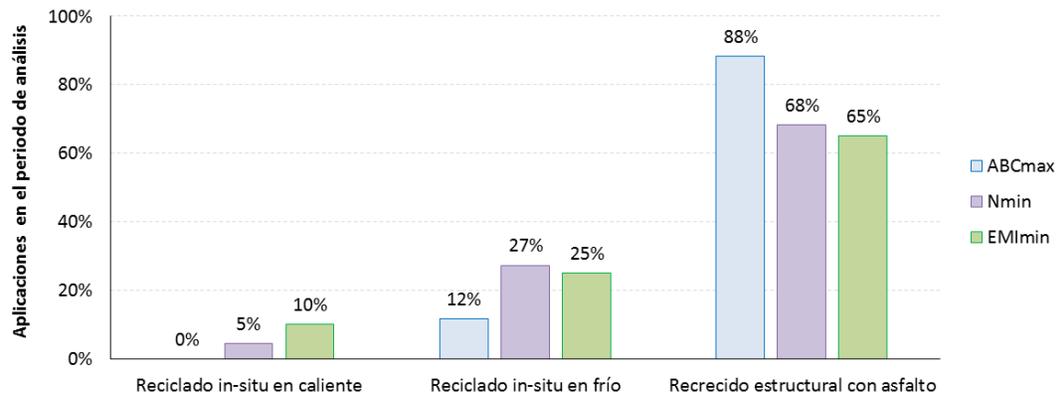


FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-15: Tratamientos de preservación óptimos en pavimentos asfálticos

De este análisis también se concluye que la preservación con sello de agregados resulta poco competitiva en términos técnicos, económicos y ambientales; siendo escasamente empleada en los programas de conservación óptimos (Figura 5-15).

En relación a los tratamientos de mantenimiento, se observa que los programas óptimos consideran, mayoritariamente, recrecidos estructurales con asfalto (Figura 5-16). Por su parte, los tratamientos que contemplan operaciones de reciclado, son únicamente considerados en los programas óptimos cuando se incluye en la evaluación el aspecto ambiental (soluciones N_{min} y EMI_{min}).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-16: Tratamientos de mantenimiento óptimos en pavimentos asfálticos

Por su parte, el tratamiento de preservación empleado en los programas de conservación óptimos para pavimentos de hormigón es, en todos los casos, el cepillado. El recrecido funcional con asfalto, en cambio, resulta poco competitivo, no estando contemplado en ninguno de los programas óptimos de conservación.



FUENTE: Elaboración propia

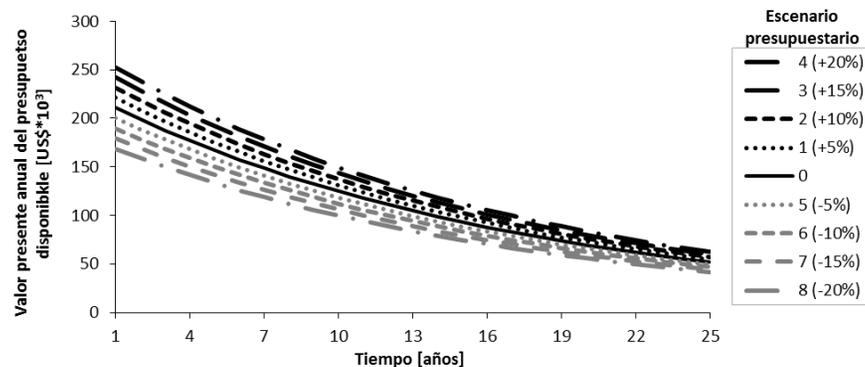
Figura 5-17: Tratamientos de mantenimiento óptimos en pavimentos de hormigón

En los tratamientos de mantenimiento óptimos para pavimentos de hormigón, en cambio, se detecta más variabilidad (Figura 5-17). Así, si bien los programas óptimos consideran, en mucho de los casos, el recrecido estructural con asfalto, se observan

variaciones en la consideración de recrecidos con hormigón y la reparación de losa. El primero es más utilizado en el programa de máxima efectividad (ABC_{max}), mientras que en el programa de menores emisiones (EMI_{min}) tiene mayor aplicación la reparación de losa (Figura 5-17).

5.5 Estudio de Sensibilidad a las Restricciones Presupuestarias

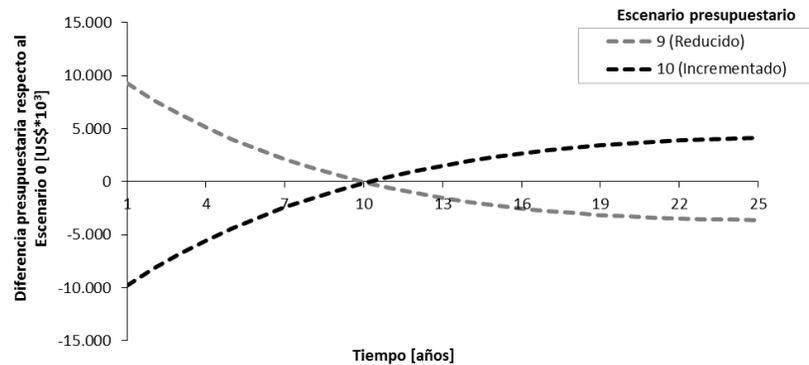
Una de las principales ventajas de la herramienta de optimización propuesta es que permite analizar el efecto de distintos escenarios de restricción presupuestaria. Con el objetivo de analizar esta capacidad, en esta sección se analizan los programas de conservación obtenidos bajo 10 escenarios presupuestarios. El primero de los escenarios analizados (Escenario 0) corresponde con el escenario utilizado en las aplicaciones previas presentadas en este trabajo de investigación. Este escenario (presentado en detalle en el Anexo G) establece una base para la comparación del resto de escenarios. Los escenarios 1 al 8 consisten en variaciones porcentuales del escenario base (Figura 5-18).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-18: Escenarios presupuestarios con variación porcentual del presupuesto

Por último, los escenarios restantes (escenarios 9 y 10) consideran presupuestos cuyo valor actual total es el mismo al escenario base pero que presentan distinta distribución temporal de fondos a lo largo del periodo de análisis (Figura 5-19). Así, el escenario 9 considera inicialmente una capacidad presupuestaria mayor al caso base, la cual se va reduciendo a lo largo del periodo de análisis (Figura 5-19). Por el contrario, el escenario 10 presenta una capacidad presupuestaria inicial menor a la base, que se va aumentando a lo largo del periodo de análisis (Figura 5-19).



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-19: Escenarios presupuestarios con distinta distribución temporal

Los 10 escenarios presentados se optimizaron con la heurística híbrida multiobjetivo GRASP-GLS-GFB. En estas aplicaciones se consideró una variación gradual del parámetro ambiental (w_{amb}) en intervalos de 0,05; una relajación de la restricción presupuestaria ($\alpha = 1,05$) y los parámetros calibrados en la sección 5.2 ($\lambda = 100$; $\eta = 0,10$; GFB con movimiento H5 y $N_{itersm,max} = 1.000$). Bajo estas consideraciones, el análisis de los 10 escenarios presupuestarios supuso la evaluación de 231 ejecuciones de la herramienta de optimización, en cada una de las cuales se evaluaron un total de

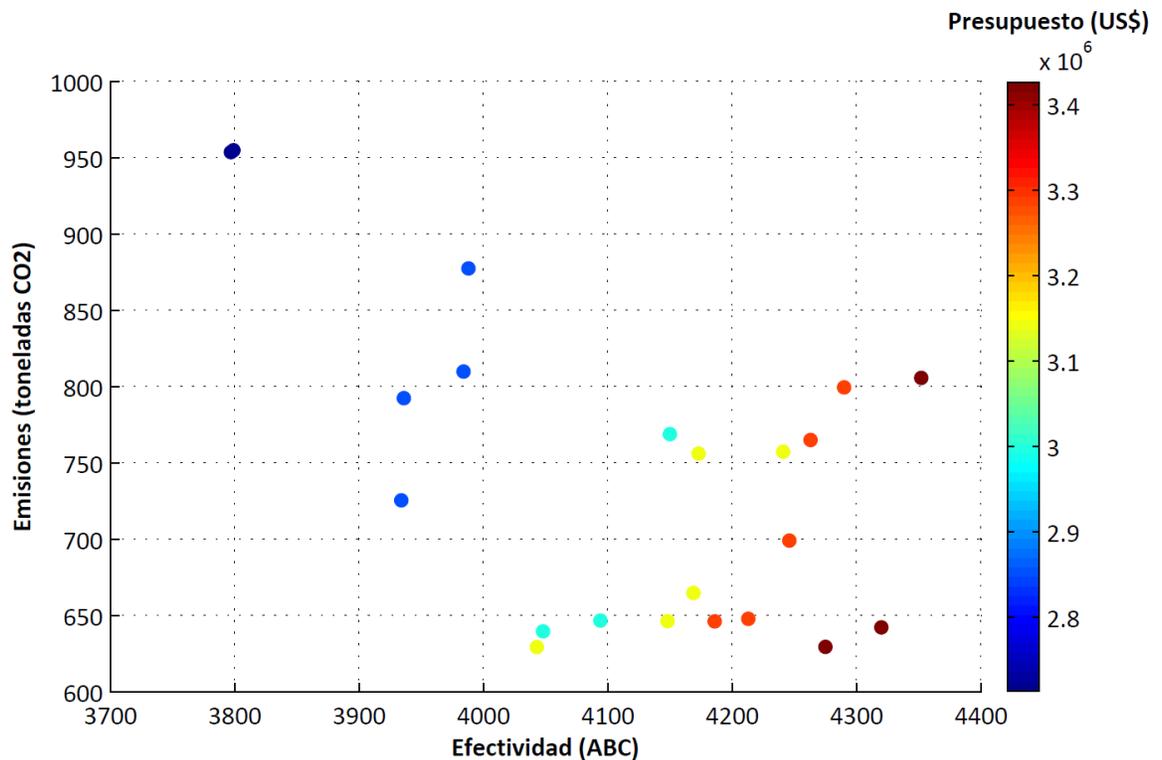
25 soluciones. El detalle de las soluciones no dominadas obtenidas en esta optimización se recoge en el Anexo L.

5.5.1 Variaciones porcentuales del presupuesto disponible

Del análisis de variaciones porcentuales del presupuesto disponible se constató que la red analizada es especialmente sensible a las reducciones presupuestarias. De hecho, no fue posible diseñar programas de conservación factibles cuando las reducciones del presupuesto fueron superiores al 5% (escenarios 6 a 8). Esto es debido a que ciertos tramos de la red son clave para garantizar la factibilidad de las soluciones.

Es el caso del tramo 2, el cual presenta la condición inicial más desfavorable de la red ($ICPU = 5,2$) y la segunda mayor superficie a tratar (3.060 m^2). Este tramo debe ser tratado durante los dos primeros años del periodo de análisis para garantizar el cumplimiento de la restricción técnica del problema. Sin embargo, el coste total de tratamiento del tramo 2 es superior al presupuesto disponible en los escenarios con reducciones presupuestarias superiores al 5%. Por lo tanto, en estos escenarios, no existen soluciones factibles que garanticen el cumplimiento de las restricciones técnicas y económicas. En este caso, sería interesante explorar la sensibilidad del problema a las variaciones en los umbrales de condición mínima exigidos. Este estudio, sin embargo, queda fuera del alcance de la presente tesis doctoral y se propone como futura línea de investigación.

Ante esta situación y, para poder llevar a cabo una comparación equitativa de los escenarios analizados, a continuación se analizan, únicamente, aquellos escenarios en los que se obtuvieron soluciones factibles al problema.



FUENTE: Elaboración propia

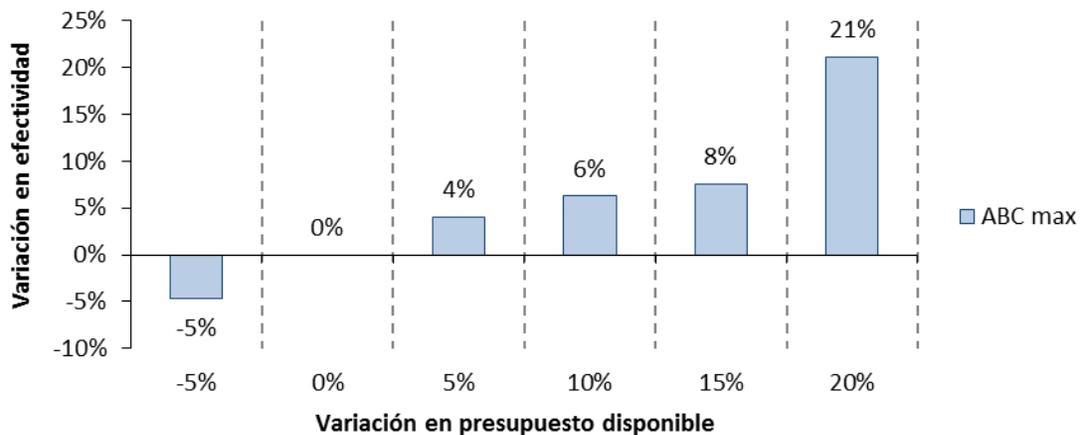
Figura 5-20: Soluciones no dominadas con variaciones porcentuales del presupuesto

La Figura 5-20 recoge las soluciones óptimas no dominadas obtenidas en el análisis de los escenarios 1 al 6, los cuales consideran variaciones porcentuales del presupuesto disponible. En esta figura, el presupuesto disponible se representa con una escala de colores, representando así las soluciones óptimas no dominadas bajo criterios económicos, técnicos y ambientales. De esta figura se observa que los escenarios con mayores restricciones presupuestarias (graficados en azul en la Figura 5-20), presentan pocas alternativas óptimas no dominadas. Estos programas se

caracterizan por presentar baja efectividad y altos niveles de emisiones. Por el contrario, a medida que aumenta el presupuesto disponible (soluciones en tonos rojos en la Figura 5-20), las soluciones óptimas no dominadas consisten en alternativas con mayor efectividad y menores emisiones.

De entre las soluciones obtenidas, se estudian a continuación las soluciones de menor impacto ambiental (EMI_{min}) y mayor efectividad (ABC_{max}) obtenidas en los escenarios en los que se obtuvieron soluciones factibles (escenarios 1 a 6).

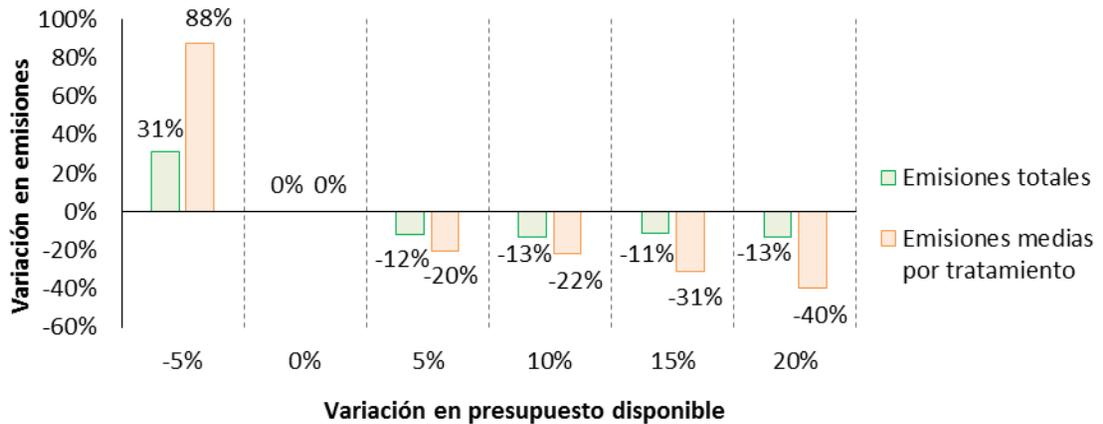
En términos técnicos, se observa una ligera variación de la efectividad cuando el incremento o reducción en el presupuesto disponible son pequeños (Figura 5-21). De hecho, cambios de entre el 5 y el 15% en el presupuesto disponible inducen variaciones de entre el 5 y el 8% en la efectividad máxima obtenida. Sin embargo, esta tendencia cambia de manera significativa cuando se dispone de un presupuesto más holgado. Así, cuando el incremento presupuestario pasa del 15 al 20%, la efectividad aumenta del 7 al 21%.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-21: Variación de la efectividad con el presupuesto disponible

En términos ambientales, se concluye que las soluciones óptimas son más sensibles a las reducciones que a los incrementos presupuestarios (Figura 5-22). Así, en la Figura 5-22 se observa cómo la solución de menor impacto ambiental (EMI_{min}) presenta un aumento en las emisiones totales del 31% cuando el presupuesto se reduce en un 5%. En cambio, un aumento presupuestario de la misma proporción, genera una reducción de las emisiones totales del 12%. Es más, esta reducción permanece prácticamente constante para todos los escenarios analizados en los que se aumenta la capacidad presupuestaria (Figura 5-22). Sin embargo, se observa que, a medida que se incrementa el presupuesto disponible, aumenta también el número de actuaciones previstas en los programas óptimos de conservación.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-22: Variación de las emisiones con el presupuesto disponible

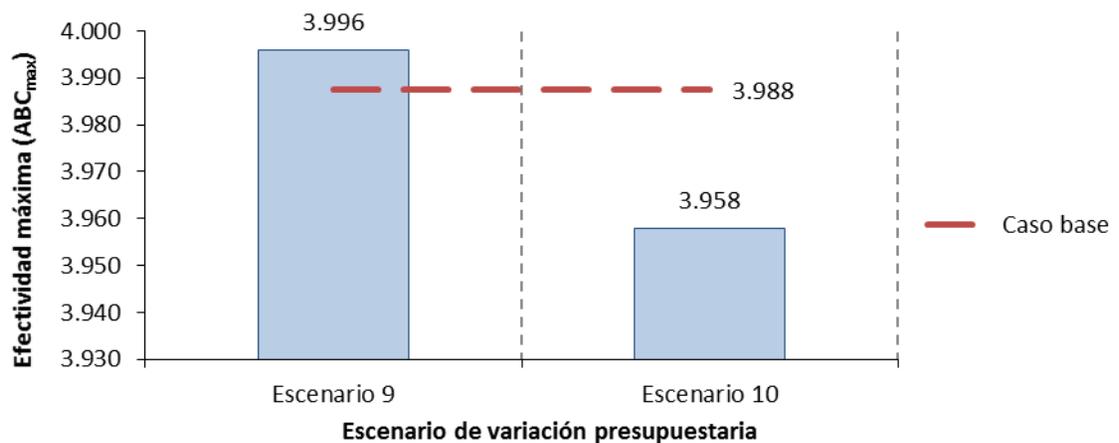
A la vista de esta información se deduce que, si bien el aumento de la capacidad presupuestaria no reduce de forma significativa la cantidad total de emisiones, sí existe una reducción en las emisiones medias de los tratamientos aplicados. El aumento presupuestario permite, por tanto, seleccionar tratamientos con menores

emisiones y, por tanto, más respetuosos con el medio ambiente. Estos tratamientos son, en su mayoría, tratamientos de preservación que son aplicados cuando la red presenta un mayor nivel de servicio, para lo cual es necesario disponer de mayores presupuestos de conservación.

En términos prácticos y, a la vista de estos resultados, se concluye que el presupuesto base (escenario 0) resulta razonablemente adecuado para gestionar la red de estudio. Por una parte, una reducción de este presupuesto generaría un aumento considerable en las emisiones de CO₂, además de reducir la efectividad y, en consecuencia, el nivel de servicio de la red. Por otra parte, los beneficios derivados de un aumento presupuestario son prácticamente constantes para aumentos de entre el 5 y el 15% del presupuesto; siendo especialmente notorios a partir de un incremento del 20%. Por lo tanto, si el gestor encargado de la conservación de la red de estudio dispusiera de una mayor capacidad presupuestaria, se aconsejaría un ligero aumento del presupuesto (entorno al 5%) o bien, una mejora sustancial del mismo (entorno al 20%). Es en estos escenarios donde se consiguen los mayores beneficios técnicos y ambientales, mientras que las mejoras introducidas en los escenarios intermedios (con aumentos entre el 5 y el 20%) son mínimas. De hecho, al aumentar el presupuesto entre un 5 y un 15% la efectividad sólo aumenta del 4 al 8%, mientras que las emisiones permanecen prácticamente constantes.

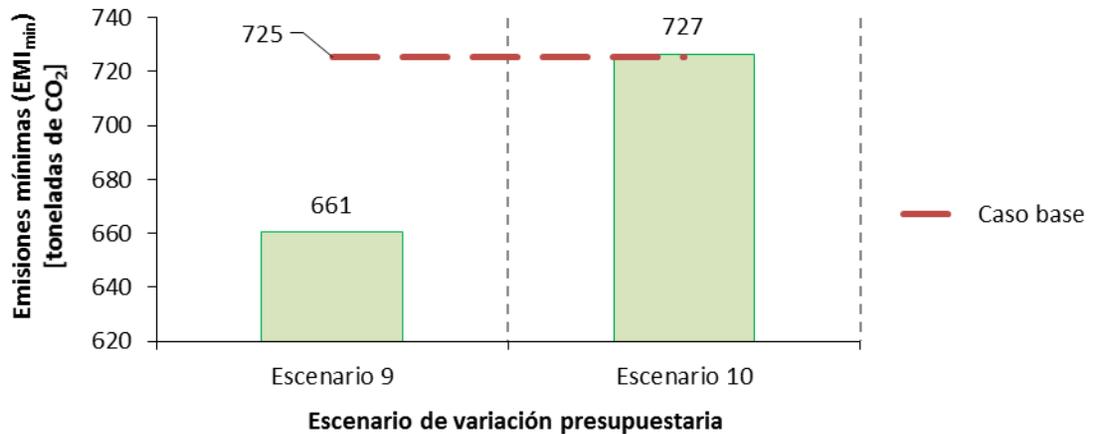
5.5.2 Variaciones en la distribución temporal del presupuesto disponible

La Figura 5-23 y Figura 5-24 muestran las soluciones óptimas de máxima efectividad y mínimas emisiones obtenidas en los escenarios analizados con variación temporal del presupuesto disponible. A la vista de estos resultados se deduce que el escenario 9, con una capacidad presupuestaria inicial mayor que va reduciéndose en el tiempo es la política más eficiente para tratar la red de estudio, pues es la que obtiene el mejor desempeño en términos técnicos y ambientales. Al compararla con el caso base, en el que se dispone de un presupuesto anual constante, el escenario 9 permite una reducción de las emisiones del 9% y un incremento de la efectividad del 0,2%. Por el contrario, la política con bajo presupuesto inicial (Escenario 10) resulta en programas óptimos menos eficientes que generan un impacto ambiental superior al generado en el escenario base y en el escenario 9.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-23: Efectividad en escenarios con variación temporal del presupuesto



FUENTE: Elaboración propia

Figura 5-24: Emisiones en escenarios con variación temporal del presupuesto

En base a estos resultados, se puede concluir que la distribución temporal del presupuesto para la conservación de la red es un factor clave en el desempeño técnico y ambiental de la misma. En el caso concreto de la red de estudio, resulta más beneficiosas la inversión constante o la alta inversión inicial.

5.6 Discusión y Conclusiones Derivadas de la Optimización Multiobjetivo

A la vista de los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo heurístico híbrido al caso de estudio, pueden derivarse las siguientes conclusiones:

En base a la evidencia demostrada por los resultados de validación del algoritmo híbrido propuesto (sección 5.3.2), se puede concluir que, tanto en términos técnicos y computacionales, el algoritmo GRASP-GLS-GFB resulta más eficiente que los algoritmos heurísticos simples presentados en el capítulo 4. De hecho, el algoritmo GRASP-GLS-GFB diseña programas de conservación con una efectividad media 9%

superior a la obtenida con el algoritmo clásico más eficaz requiriendo para ello, un esfuerzo computacional menor en el 57% de los escenarios analizados.

La eficiencia del algoritmo híbrido para encontrar soluciones óptimas al problema de asignación de recursos se ve comprometida en aquellos casos en los que hay un número reducido de alternativas de conservación. Los resultados obtenidos en la sección 5.3.2 refuerzan la evidencia detectada en el capítulo 4, en base a la cual se puede concluir que los algoritmos heurísticos basados en búsquedas locales está determinada por la capacidad que tengan éstos de explorar el espacio de soluciones de manera continua o con pequeños movimientos.

La evaluación de alternativas en términos de un indicador de evaluación sostenible (presentado en la sección 5.1) permite la optimización de los programas de conservación considerando, de forma integrada, aspectos técnicos, económicos y ambientales en el ciclo de vida de la infraestructura. Puesto que la importancia del aspecto ambiental en este indicador está controlada por el parámetro ambiental w_{amb} , es posible obtener una frontera de Pareto de soluciones óptimas en términos técnicos y ambientales con una variación gradual de este parámetro.

La consideración del impacto ambiental en la optimización multiobjetivo complica el proceso de búsqueda de soluciones factibles, siendo computacionalmente más costoso encontrar soluciones que cumplan las restricciones del problema. Esta conclusión se pone en evidencia en la aplicación recogida en la sección 5.4.1, en la que sólo un 5% de las soluciones calculadas resultaron factibles.

Los métodos de optimización multiobjetivo basados en la suma ponderada de objetivos presentan la limitación de no garantizar una frontera de Pareto uniforme cuando las funciones objetivo no son lineales. El número de soluciones no dominadas viene principalmente determinado por el incremento considerado en la variación del peso entre objetivos. Es necesario, por tanto, definir una solución de compromiso entre el esfuerzo computacional necesario para definir el conjunto de soluciones no dominadas y la necesidad, por parte del tomador de decisión, de disponer de un conjunto más o menos continuo de soluciones.

En los problemas de optimización multiobjetivo con una definición a posteriori de preferencias, el método de programación por compromiso resulta especialmente adecuado para seleccionar una solución de la frontera de Pareto. A diferencia de otros métodos disponibles tales como la suma ponderada o el AHP, la programación por compromiso presenta la ventaja de no necesitar definir pesos relativos entre los objetivos, resultando así en una selección más objetiva de la solución óptima.

El coeficiente ambiental propuesto (β_{amb}) mejora el diseño de programas de conservación. Esta conclusión se deriva de los resultados obtenidos en la sección 5.4.2, en los que se observa que todas las soluciones óptimas no dominadas en la aplicación multiobjetivo son diseñadas con un valor no nulo del parámetro ambiental.

El algoritmo híbrido propuesto permite una gestión más sostenible que los algoritmos heurísticos basados en búsquedas locales, ya que permite diseñar programas con una efectividad similar con una reducción superior al 20% de las emisiones de CO₂.

En base a las evidencias mostradas en la sección 5.3.2, la herramienta heurística mejora la gestión actual de conservación de la red. De hecho, con el mismo presupuesto disponible, la herramienta diseña programas de conservación que aumentan la condición media de la red hasta un 22%, además de reducir las emisiones de CO₂ en un 12%.

Los programas óptimos consideran una conservación proactiva de la red con la aplicación de tratamientos de preservación cuando la condición de los pavimentos aún es buena. En base a la evidencia demostrada por los resultados obtenidos en la sección 5.4.3, los tratamientos de preservación más eficientes son el riego de neblina y la lechada para los pavimentos de asfalto, y el cepillado para pavimentos de hormigón. En cuanto a los tratamientos de mantenimiento, las soluciones óptimas consideran mayoritariamente el recrecido estructural con asfalto tanto para pavimentos de asfalto como de hormigón.

Del estudio de variaciones porcentuales del presupuesto disponible se constató que, en términos técnicos, existe una ligera variación de la efectividad cuando el incremento o reducción del presupuesto es pequeño. Sin embargo, esta tendencia cambia de manera significativa cuando se dispone de un presupuesto más holgado.

En términos ambientales, las soluciones óptimas del caso de estudio son más sensibles a las reducciones que a los incrementos presupuestarios. De hecho, los resultados recogidos en la sección 5.5.1 muestran cómo, en el caso de estudio analizado, una reducción del presupuesto del 5% genera un aumento del 31% de las

emisiones; mientras que un aumento en la misma proporción permite una reducción de las emisiones de un 12%.

En términos técnicos, una reducción del presupuesto de un 20% genera una reducción de la efectividad del 4% y un incremento de emisiones de más del 150%, mientras que un aumento de la misma proporción genera un incremento de efectividad de únicamente el 0,5% y una reducción de las emisiones del 4%.

La distribución temporal del presupuesto disponible para la conservación de la red es un factor clave en el desempeño técnico y ambiental de la misma. En el caso concreto de la red de estudio analizada, resultan más beneficiosas la inversión constante y la alta inversión inicial frente a la inversión inicial reducida que aumenta en el periodo de análisis.

6 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En base a los resultados presentados en este trabajo de investigación, se puede concluir que se ha cumplido el principal objetivo de esta investigación, que consistía en desarrollar una herramienta para la evaluación de alternativas de conservación y la optimización heurística multiobjetivo que permita una asignación más sostenible y eficiente de los recursos disponibles para la conservación de activos de infraestructura de transporte terrestre. Esta herramienta se ha validado mediante su aplicación a un caso de estudio consistente en la gestión de redes de pavimentos urbanos en Chile. En esta aplicación se emplearon datos del proyecto Fondef D09I1018 desarrollado en la Pontificia Universidad Católica de Chile.

6.1 Cumplimiento de los Objetivos de la Investigación

El desarrollo y validación de esta herramienta para la evaluación de alternativas de conservación y la optimización heurística multiobjetivo ha permitido alcanzar los objetivos específicos definidos en la investigación:

- Analizar la eficiencia de los algoritmos de optimización heurística para optimizar la asignación de recursos de conservación. La aplicación de estas heurísticas al caso de estudio urbano permitió concluir que estas resultan poco eficientes para el diseño de programas de conservación bajo restricciones técnicas y económicas.
- Mejorar la gestión actual de infraestructura mediante el desarrollo, programación y validación de un algoritmo híbrido de optimización

heurística multiobjetivo que integre los aspectos técnicos, económicos y ambientales en la evaluación de alternativas de conservación.

- Mejorar la planificación temporal de los recursos de conservación mediante el desarrollo, programación y validación de un algoritmo híbrido de optimización heurística multiobjetivo.

Para la consecución de estos objetivos específicos, se desarrollaron las siguientes actividades intermedias:

- Proponer indicadores para la evaluación técnica, económica y ambiental de alternativas de conservación basados, respectivamente, en efectividad (medida a partir del área bajo de curva de comportamiento), emisiones de CO₂ y coste actualizado del programa de conservación.
- Analizar los enfoques y métodos de optimización disponibles para la asignación de recursos de conservación en redes de infraestructura, recomendando el enfoque y métodos más adecuados para distintos escenarios.
- Definir el problema de optimización multiobjetivo existente en la asignación sostenible de recursos de conservación, identificando las funciones objetivo, variables, parámetros y restricciones del problema.
- Definir y desarrollar una herramienta computacional que integra la evaluación sostenible de alternativas de conservación y la optimización heurística multiobjetivo para resolver el problema de asignación de recursos de conservación.

Cabe además mencionar que los resultados derivados de esta investigación han sido publicados en revistas de impacto y congresos internacionales (Tabla 6-1).

Tabla 6-1: Artículos y ponencias derivadas de la investigación

ID	Título	Revista/Congreso	Estado
1	An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level	The Scientific World Journal	Publicado
2	Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management	Revista de la Construcción	Publicado
3	Sustainable pavement management: How to integrate economic, technical and environmental aspects in decision-making	Transportation Research Record y Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management (*)	Aceptado para publicación
4	Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid GRASP algorithm	Journal of Civil Engineering and Management	Enviado a revisión
5	Herramienta de optimización heurística para la gestión de infraestructuras: aplicación a una red de pavimentos urbanos en Chile	11° Congreso Internacional Provincial	Publicado
6	Application of simple and hybrid local search heuristics for the long-term optimization of pavement maintenance strategies at the network level	Transportation Research Board 93rd Annual Meeting	Publicado
7	Heuristic optimization model for infrastructure asset management	Advances in Artificial Intelligence	Publicado
8	Optimization and prioritization methods for pavement network management	Transportation Research Board 92nd Annual Meeting	Publicado
9	Modelo de optimización para la gestión del mantenimiento de una infraestructura de edificación	2° Congreso de enseñanza de las matemáticas en Ingeniería de Edificación	Publicado

(*) Presentación reconocida como una de las “*Best presentation AISIM*”

FUENTE: Elaboración propia

Los temas abordados en los artículos enviados a revistas de impacto han sido, por una parte, la revisión y análisis de los métodos para la evaluación económica y ambiental de alternativas de conservación (ID 1 en Tabla 6-1); y por otra, los métodos y enfoques para optimizar la asignación de recursos (ID 2 en Tabla 6-1). Estas publicaciones se complementan con un artículo, premiado como una de las mejores presentaciones en la *10th Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management* (Virginia, EEUU), que ha sido aceptado para su publicación en la revista “*Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*” (ID 3 en Tabla 6-1). En este estudio se analizan distintos métodos para integrar la evaluación técnica, económica y ambiental en la priorización de alternativas. Por último, se ha preparado un artículo en el que se presenta la aplicación monobjetivo con el algoritmo híbrido propuesto en esta investigación. Este artículo se ha enviado para su revisión en una revista de impacto (ID 4 en Tabla 6-1).

Las ponencias realizadas en congresos han consistido en la presentación del marco conceptual de la herramienta de optimización (ID 5 y 9 en Tabla 6-1), así como aplicaciones preliminares de la misma (ID 6, 7 y 8 en Tabla 6-1).

Como complemento de esta información, en el Anexo M se recogen las referencias completas de estas publicaciones así como una copia (versión autor) de los artículos publicados en revistas científicas.

6.2 Conclusiones de la Investigación

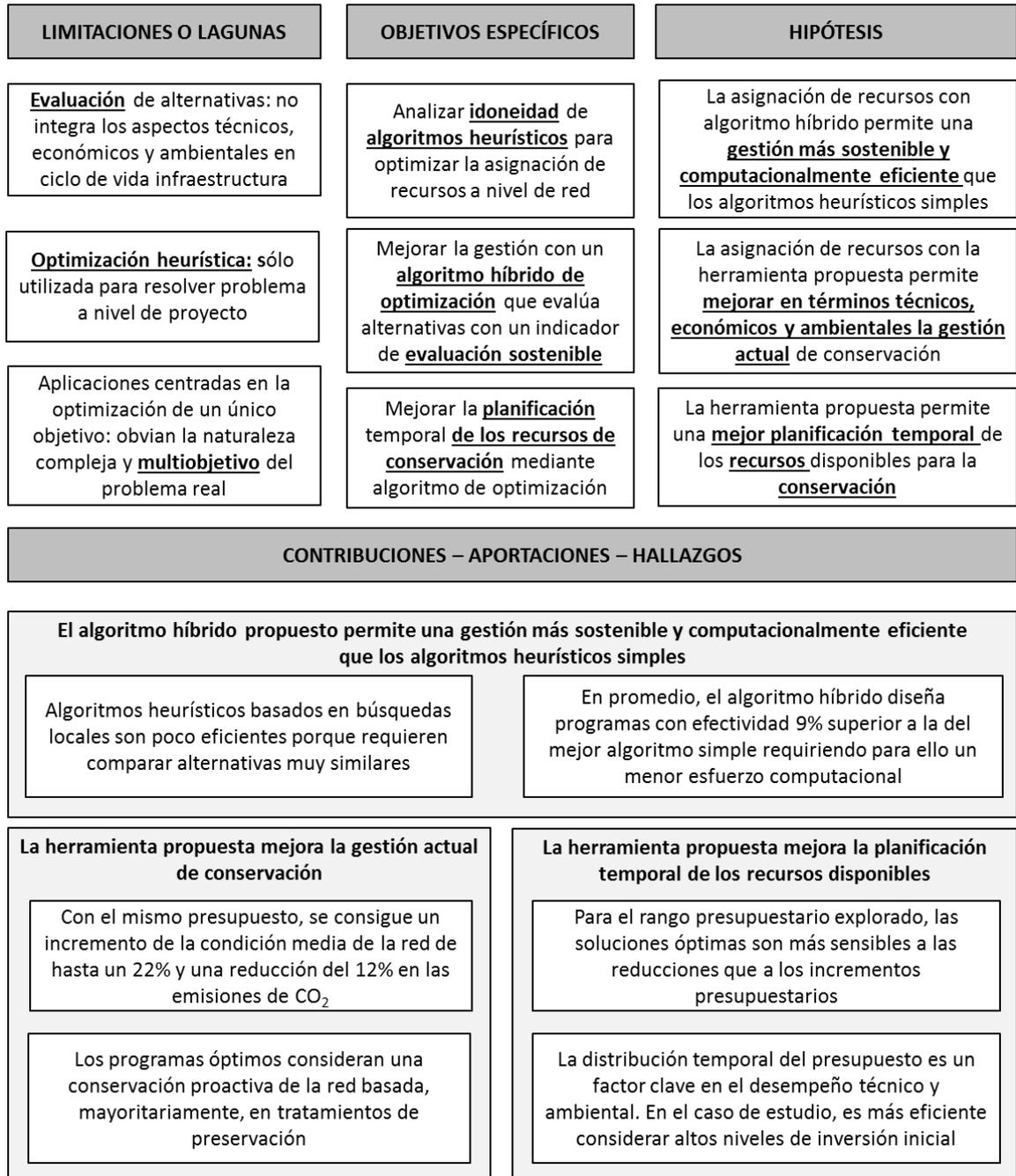
A continuación se resumen las conclusiones específicas derivadas de esta investigación.

- En base a las evidencias detectadas en el caso de estudio presentado en el capítulo 5, se concluye que la herramienta propuesta mejora la gestión actual de la conservación. De hecho, con el mismo presupuesto total, la herramienta propuesta diseña programas de conservación que aumentan la condición media de la red hasta un 22%, permitiendo además reducir las emisiones de CO₂ en un 12%. Esta mejora en condición permite mantener a lo largo del periodo de análisis, un valor promedio de condición de la red similar a la condición de partida.
- Los programas óptimos diseñados con la herramienta propuesta consideran una conservación proactiva de la red basada, mayoritariamente, en tratamientos de preservación que son aplicados cuando la condición de los pavimentos aún es buena.
- La herramienta propuesta permite una mejor planificación temporal de los recursos disponibles para la conservación. Para el rango presupuestario explorado, las soluciones óptimas en la red de estudio son más sensibles a las reducciones que a los incrementos presupuestarios.
- La distribución temporal del presupuesto es un factor clave en el desempeño técnico y ambiental. Los resultados mostrados en la sección 5.5.2 demuestran que, en el caso de estudio, resulta más eficiente la inversión constante y la inversión inicial importante frente a la inversión inicial reducida que aumenta en el periodo de análisis.
- El algoritmo híbrido propuesto permite una gestión más sostenible y computacionalmente eficiente que los algoritmos heurísticos simples. De acuerdo a los escenarios de validación analizados en la sección 5.3, la

herramienta propuesta diseña programas con una efectividad 9% superior a la del mejor algoritmo clásico con un esfuerzo computacional inferior.

- Los algoritmos heurísticos basados en búsquedas locales son poco eficientes para resolver el problema de asignación de recursos porque requieren comparar alternativas muy similares. Los resultados recogidos en las secciones 4.3 y 5.3 evidencian que estos algoritmos son capaces de explorar de forma eficiente el espacio de soluciones cuando las alternativas consideradas son continuas o generan pequeños cambios en la solución de partida. Este es el caso de la aplicación exitosa del algoritmo GFB presentada en el trabajo de Tsunokawa et al. (2006), en el cual se optimizaba el espesor y tiempo de aplicación de un recocado asfáltico para una sección de firme.

Como complemento a esta descripción, en la Figura 6-1 se resumen las conclusiones de la investigación y su relación con las limitaciones identificadas en el estado del arte y la práctica actuales y los objetivos específicos e hipótesis planteadas en la investigación.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 6-1: Contribuciones del trabajo y relación con las lagunas, hipótesis y objetivos de la investigación

6.3 Recomendaciones Prácticas

La investigación ha permitido identificar las siguientes recomendaciones prácticas para la gestión de activos de infraestructura de transporte terrestre:

- La integración de aspectos ambientales a los técnicos y económicos considerados, tradicionalmente, en la gestión de infraestructura permite una asignación más sostenible de los recursos disponibles para la conservación. En base a las evidencias detectadas en la aplicación al caso de estudio chileno (capítulo 5), se concluye que la herramienta propuesta permite diseñar, bajo las mismas restricciones presupuestarias, programas de conservación con mayores prestaciones técnicas y menor impacto ambiental permitiendo, por tanto, una gestión más sostenible de la red.
- La conservación temprana de los pavimentos, cuando su condición aún es buena, permite una gestión más eficiente en términos técnicos, económicos y ambientales. Esta recomendación se deriva del análisis de los programas óptimos de conservación presentados en el capítulo 5, lo cuales están basados en una política de conservación proactiva de la red.
- En base a la evidencia demostrada por los resultados obtenidos en la sección 5.4.3, los tratamientos de preservación más eficientes son el riego de neblina y la lechada, para los pavimentos de asfalto, y el cepillado para pavimentos de hormigón. En relación a los tratamientos de mantenimiento, las soluciones óptimas consideran, mayoritariamente, recrecidos estructurales con asfalto, tanto para pavimentos de asfalto como de hormigón. Teniendo en cuenta que los tratamientos considerados en la optimización son efectivos para tratar distintos tipos de deterioro y que estas conclusiones se han derivado de un análisis a nivel de red, la aplicación final de los tratamientos propuestos por la herramienta requiere de un estudio en detalle, propio de una gestión a nivel de proyecto, que

evalúe los deterioros específicos existentes en las secciones a tratar, verificando así la idoneidad del tratamiento propuesto.

- La herramienta propuesta permite analizar los efectos técnicos, económicos y ambientales de distintos escenarios presupuestarios, permitiendo así una mejor decisión por parte del gestor de la infraestructura. Así, en base a los escenarios analizados para el caso de estudio en la sección 5.5, se concluye que el presupuesto base analizado resulta razonablemente adecuado para gestionar la red de estudio. Por una parte, una reducción de este presupuesto generaría un aumento considerable en las emisiones de CO₂, además de reducir la efectividad y, en consecuencia, el nivel de servicio de la red. Por otra parte, los beneficios derivados de un aumento presupuestario son prácticamente constantes para aumentos de entre el 5 y el 15% del presupuesto, siendo especialmente notorios a partir de un incremento del 20%.
- Los beneficios del uso de la herramienta propuesta se han analizado considerando un caso de estudio real consistente en la gestión de una red de pavimentos urbanos en Chile. Sin embargo, debería analizarse la capacidad de la herramienta para su aplicación real mediante su integración en un sistema de gestión de pavimentos.
- Sería recomendable realizar un análisis más detallado de los programas de conservación óptimos obtenidos con la herramienta, con el objetivo de definir estándares de conservación optimizados para distintos tipos de secciones. Los estándares de conservación, utilizados en diversos sistemas de gestión de pavimentos, definen el conjunto de actividades de conservación aplicables a un tipo de pavimento durante su ciclo de vida bajo una política de conservación (que puede ser temporal o por respuesta). Si bien este enfoque secuencial puede no resultar en una solución óptima del problema, presenta dos ventajas: es un proceso más comprensible para la gestión real de redes de infraestructura y permitiría

incorporar otros aspectos en la priorización de los tramos a tratar (como, por ejemplo, aspectos sociales, políticos e institucionales).

6.4 Limitaciones

Se detallan a continuación las limitaciones detectadas en el presente trabajo de investigación, las cuales permiten definir futuras líneas de investigación.

6.4.1 Limitaciones generales

- Si bien la herramienta de optimización propuesta se define para su aplicación a la gestión de activos de infraestructura de transporte terrestre, la aplicación al caso de estudio se particulariza a la gestión de redes de pavimentos urbanos en Chile.
- La herramienta propuesta se centra en la asignación óptima de los recursos disponibles para la conservación de redes de infraestructura. Este análisis considera distintas alternativas de conservación en el ciclo de vida de la infraestructura, si bien no contempla la etapa de diseño de las mismas.
- La herramienta propuesta optimiza la asignación de los recursos disponibles para conservar la red permitiendo, además, estudiar el efecto de distintos escenarios presupuestarios. Sin embargo, sería interesante complementar este análisis con el estudio de las necesidades de la red, de forma que la herramienta permita definir los presupuestos mínimos requeridos para conservar la red considerando distintos niveles de servicio.
- Así mismo, sería interesante comparar los beneficios derivados del enfoque holístico considerado en este estudio, respecto del enfoque secuencial tradicionalmente empleado en la gestión de infraestructura.
- La evaluación económica propuesta en este trabajo compara, por una parte, los costes de aplicación de los tratamientos con el presupuesto disponible

para la conservación de la red. Por otra, considera una evaluación de los beneficios a los usuarios a través de un indicador de efectividad, evaluado en términos del área encerrada por la curva de deterioro y un umbral mínimo de condición. Esta evaluación podría completarse con una evaluación económica que cuantificase, en términos monetarios, los beneficios sociales de una mejor condición de la red de activos.

- La evaluación ambiental propuesta en este trabajo considera únicamente las emisiones de CO₂ generadas por los distintos tratamientos de conservación. Si bien este enfoque permite recoger los beneficios ambientales de la aplicación de tratamientos más respetuosos con el medio ambiente (ej. técnicas de reciclado de pavimento), no considera el incremento de emisiones generado por los vehículos al circular por pavimentos con peor condición.
- Este trabajo propone incorporar el aspecto ambiental a los técnico-económicos tradicionalmente empleados. Si bien esta consideración va dirigida a una gestión más sostenible de la infraestructura, deberían incorporarse los aspectos sociales, financieros, políticos e institucionales para garantizar la integración de todos los aspectos necesarios para la gestión sostenible de infraestructura.
- El algoritmo híbrido propuesto (GRASP-GLS-GFB) permite una asignación de recursos más sostenible y computacionalmente eficiente que los algoritmos heurísticos simples ensayados (GFB, SA, TA y GRASP). Sin embargo, para poder evaluar los beneficios del uso del algoritmo híbrido propuesto, éste debería compararse con otros métodos de optimización empleados en la gestión de infraestructuras.

6.4.2 Limitaciones de la aplicación al caso de estudio

Con el objetivo de analizar la capacidad computacional de la herramienta propuesta, en la aplicación al caso de estudio se tomaron una serie de consideraciones que deberían validarse para la aplicación real de la herramienta.

- A partir de ensayos de auscultación estructural y conteo de tránsito se debería validar (o, en su caso, modificar) el criterio utilizado para definir las curvas de deterioro de pavimentos de la red estructurante y secundaria, así como los parámetros técnicos asociados a las distintas clasificaciones funcionales de la red.
- En este trabajo de investigación se ha considerado que, tras la aplicación del tratamiento, el pavimento continúa deteriorándose con el mismo modelo de deterioro que presentaba inicialmente.

6.5 Futuras Líneas de Investigación

Teniendo en cuenta las limitaciones del presente trabajo, se proponen las siguientes líneas de investigación futura:

- Aplicación y validación de la herramienta propuesta para el diseño de programas de conservación de otras redes de pavimentos urbanos y otras infraestructuras de transporte terrestre.
- Incorporación de otras fases del ciclo de vida de la infraestructura en el proceso de optimización. De esta forma, la herramienta permitiría evaluar distintas alternativas en la fase de diseño de la infraestructura.
- Incorporación de un módulo de análisis de necesidades en la herramienta de optimización de forma que se puedan estudiar las necesidades de conservación según el nivel de servicio exigido.

- Incorporación de un análisis probabilístico que considere la variabilidad de los datos considerados en la optimización.
- Comparación de los programas de conservación obtenidos con la herramienta de optimización heurística propuesta respecto a los obtenidos bajo un enfoque secuencial.
- Comparación de los programas de conservación óptimos diseñados con el algoritmo híbrido propuesto (GRASP-GLS-GFB) y los obtenidos con otros métodos de optimización empleados en la gestión de infraestructuras.
- Mejora en la metodología de evaluación económica propuesta mediante la cuantificación de beneficios y costes sociales en términos monetarios.
- Mejora en la metodología de evaluación ambiental propuesta mediante la actualización de los datos de emisiones, la consideración del incremento de emisiones derivadas de una mala condición de la infraestructura y la evaluación de otros indicadores ambientales (consumo energético, consumo de agua, etc.).
- Definición de una metodología para evaluar e integrar los aspectos sociales, financieros, políticos e institucionales a los técnicos, económicos y ambientales propuestos en esta investigación. La consideración integrada de estos siete aspectos en el ciclo de vida de la infraestructura permitirá una gestión sostenible de infraestructura.
- Desarrollo de indicadores que, basados en mediciones de desempeño, resulten más intuitivos para transmitir a público menos especializado los resultados de una gestión sostenible de infraestructura.

Así mismo, se proponen las siguientes líneas de investigación para cubrir las limitaciones detectadas en la aplicación al caso de estudio:

- Validación o desarrollo de los modelos de deterioro considerados para los pavimentos de la red estructurante y secundaria así como de los parámetros técnicos asociados a las distintas clasificaciones funcionales de la red.
- Mejora en la simulación del efecto de los tratamientos en la condición de la infraestructura mediante el desarrollo de curvas de deterioro específicas para cada tratamiento.

7 RESUMEN EXTENDIDO EN INGLÉS (Incluidas conclusiones)

En este capítulo se recoge un resumen extendido de la tesis doctoral en inglés, siendo este uno de los requisitos exigidos para optar a la mención internacional del título de doctor, según el RD 99/2011 por el que se regulan las enseñanzas de doctorado en España.

Este capítulo consiste en una traducción resumida del planteamiento del problema (sección 1.1) y una traducción completa de los objetivos, hipótesis, alcance y método de la investigación (secciones 1.3 a 1.6), así como una traducción del capítulo completo de conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación (capítulo 6).

Thesis title:

“MULTIOBJECTIVE HEURISTIC OPTIMIZATION FOR THE MANAGEMENT OF LAND TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE ASSETS”

7.1 Background

Transportation infrastructure is one of the major assets of countries because the infrastructure contributes to the economic and social development of the country (Queiroz et al. 1994; Uddin et al. 2013). However, available funds for the maintenance of the infrastructure are often insufficient, leading to rapid deterioration. Delaying maintenance implies not only a risk of structural failure, but also an increase in cost because the majority of the infrastructure requires increasingly larger investments as it ages (Schliesser y Bull 1992; CSCE et al. 2012). Late preservation efforts have been shown to triple the cost of rehabilitation activities and vehicle operating costs (Geoffroy 1996; CSCE et al. 2012).

In this context arises the discipline of infrastructure asset management. By combining engineering principles with business practices and economic theories, infrastructure asset management enables an optimal resource allocation for the operation and maintenance of infrastructure over its lifecycle (FHWA 1999; OECD 2001; NAMS 2006). However, the optimal allocation of maintenance resources at the network level poses a combinatorial optimization problem with a solution that is not straightforward. S^{TxN} possible solutions are available in a network with N assets and S possible treatments over a planning horizon of T years (Chan et al. 1994; Golroo y Tighe 2012).

In addition to the mathematical complexity of solving the problem, the difficulty in evaluating maintenance alternatives should be considered. Traditionally, this evaluation has focused on economic and technical terms. From the environmental perspective, efforts have mainly focused on reducing the effects generated by vehicle operation. However, this effect increases by 10% when the stages of road construction, use and maintenance are considered (Chester y Horvath 2009). Therefore, environmental aspects should be included in the evaluation of maintenance alternatives for a sustainable management. Recent efforts have begun to quantify the environmental impact of maintenance activities (Bennett y Greenwood 2004; Nathman et al. 2009). However, current models lack an integrated evaluation of technical, economic and environmental aspects. This limitation creates the need to develop a sustainable evaluation of maintenance alternatives that consider, in an integrated manner, the technical, economic and environmental aspects over the life-cycle of the infrastructure.

With respect to the budget allocation problem, optimization methods mainly use mathematical programming and near-optimization methods. Regarding near-optimization methods, little attention has been paid to heuristic algorithms, which have only been applied to solve the problem at a project level (Tsunokawa et al. 2006; Chou y Le 2011). These methods have successfully been applied to solve combinatorial optimization problems in other research fields such as structural design (Payá et al. 2008; Martí et al. 2013a; Torres-Machí et al. 2013) and transportation route planning (Yepes & Medina, 2006). In addition, optimization applications in infrastructure management are mainly focused on one objective, ignoring the complex and multi-objective nature of the real problem (Wu y Flintsch 2009; Wu et al. 2012). A heuristic multiobjective optimization tool should be developed that, considering a sustainable evaluation of alternatives, improves the current allocation of maintenance resources.

7.2 Objectives

The main objective of this research is to develop a tool for the sustainable evaluation of maintenance alternatives and the multiobjective heuristic optimization. This tool enables a more sustainable and efficient allocation of available resources for the maintenance of infrastructure at the network level. For this purpose, two specific objectives are identified:

- Analyze the suitability of heuristic optimization algorithms to solve the allocation of maintenance funds at the network level.

- Improve the current infrastructure maintenance management through the development, programming and validation of a hybrid heuristic optimization algorithm. The proposed algorithm considers, in an integrated manner, technical, economic and environmental aspects in the evaluation of maintenance alternatives, thus enabling a multiobjective optimization.
- Improve the planning of maintenance funds over time through the development, programming and validation of a hybrid heuristic multiobjective optimization algorithm.

To achieve these objectives, the following tasks were developed:

- Select technical, economic and environmental indicators for the evaluation of maintenance alternatives.
- Select, for different scenarios, the most suitable optimization method for the allocation of maintenance funds at the network level.
- Define the multiobjective optimization problem faced by infrastructure managers in the design of maintenance programs at the network level.
- Define and develop a computational tool that integrates a sustainable evaluation of maintenance alternatives and the multiobjective heuristic optimization in the allocation of maintenance funds.
- Optimize the allocation of maintenance funds at the network level using computational programming and the application of heuristic algorithms.
- Develop, program and validate a hybrid heuristic optimization algorithm that enables a multiobjective optimization and a sustainable approach to the evaluation of maintenance alternatives.

7.3 Hypotheses

- The allocation of maintenance funds through a hybrid heuristic multiobjective algorithm enables a more sustainable and computationally efficient management than the management obtained through algorithms based on local search heuristics.
- The optimization tool proposed in this research improves, in technical, economic and environmental terms, the current maintenance management of infrastructure.
- The proposed optimization tool enables a better planning of maintenance funds over time, improving the planning of funds over time and identifying the technical and environmental effects of different budget scenarios.

7.4 Scope of the study

The tool developed in this study aims to assist infrastructure managers in producing a more sustainable allocation of maintenance funds. In this process, the tool evaluates maintenance alternatives considering, in an integrated manner, technical, economic and environmental aspects in the infrastructure lifecycle. Based on this evaluation, the proposed tool looks for the optimal allocation of available funds for network maintenance.

Despite the fact that sustainable infrastructure management requires the integrated consideration of seven aspects (technical, economic, environmental, financial, social, political and institutional) over the infrastructure life-cycle, this study focus on the integration of technical, economic and environmental aspects. According to the

aspects identified in the background of this study, the proposed approach improves the traditional evaluation that was based only in technical and economic aspects.

The economic evaluation considered in this research consists on a comparison of maintenance costs with available budget. On the other hand, it considers an indirect evaluation of user costs in terms of an indicator based on effectiveness.

This study considers an environmental evaluation based on the emissions of CO₂ derived from the application of maintenance treatments. This indicator has been selected because CO₂ is the main contributor to greenhouse gases (IPCC 2007). Nevertheless, the methodology proposed in this research could similarly be used considering other environmental indicators.

Other methodologies could be considered to include the environmental impact in the evaluation of maintenance alternatives. One of the most common methods consists of expressing the environmental impact in monetary terms and to include the effect in the economic evaluation. This approach and other possible methods used to incorporate technical, economic and environmental aspects have been analyzed to supplement the evaluation proposed in this study. The results of this analysis are presented in a paper that has been recommended for publication in a scientific journal. However, this approach cannot be applied in this research because the objective of the budget allocation problem is to define the best allocation of available funds. Considering the environmental impact in the economic evaluation will not enable a comparison between the real maintenance costs and the available budget.

The optimization method proposed in this study is based on a hybrid, multiobjective, heuristic algorithm that tackles the budget allocation problem using a holistic approach. By contrast to the sequential approach that simplifies the problem by defining the treatment strategy first and then selecting the sections to treat, the holistic approach enables the analysis of network maintenance alternatives as a whole, before any specific treatment strategy or section has been selected.

The proposed optimization tool considers a deterministic approach of the problem. This approach, by contrast to the probabilistic approach, does not account for the variability when data are considered in the problem.

The tool developed in this study allows the analysis of the present and future technical, economic and environmental effects of different maintenance policies and budgetary scenarios. This analysis enables the establishment of correlations between the network condition and the available maintenance budget.

The optimization tool is defined in this study in a generic manner enabling, the evaluation and optimization of available funds for the maintenance of land transportation infrastructure. The generic tool must be adjusted and calibrated for its application in a specific infrastructure network. This research applies the tool to a case study dealing with the management of an urban pavement network in Chile.

7.5 Research Method

To achieve the proposed objectives, the study considered the following research method:

- Literature and state of the practice review: This stage defined the state of the art and practice for the sustainable evaluation of maintenance alternatives and the optimization methods for the allocation of available funds. Data concerning the Chilean case study were also collected. The tasks considered in this stage were the following:
 - Review of methods and indicators for the technical, economic and environmental evaluation of maintenance alternatives.
 - Selection of the technical, economic and environmental indicators for the evaluation of maintenance alternatives.
 - Review of optimization methods and approaches to solve the budget allocation problem.
 - Selection of the most suitable methods and approaches for solving the budget allocation problem in different scenarios.
 - Data collection for the application of the proposed tool to a real case study dealing with the management of an urban pavement network in Chile. This task included the review of Chilean and international pavement maintenance guides and meetings with professionals that are currently in charge of urban network maintenance. The activities related to the case study are part of a project developed by the Pontificia Universidad Católica de Chile named Fondef D09I1010 “Investigation and Development of Solutions for the Management of Urban Pavements in Chile” (Videla et al. 2010).

- Tool framework proposal: Based on the limitations and opportunities identified in the review of the literature and current practices, this stage consists of proposing a multiobjective optimization tool based on heuristic algorithms. This proposal considered the following:
 - Definition of the multiobjective optimization problem faced by infrastructure managers in the design of maintenance programs at a network level. As a result of this task, the variables, parameters, objective functions and restrictions of the optimization problem were identified.
 - Definition of the tool framework.
- Application of heuristic optimization algorithms: In this stage, different heuristic optimization algorithms were analyzed and applied to solve the budget allocation problem. The tasks included in this stage of the research were the following:
 - Computational programming of different heuristic algorithms to optimize the allocation of maintenance funds at the network level.
 - Experimental design for the calibration of the heuristic algorithms.
 - Application and calibration of the heuristic algorithms considering the Chilean case study.
- Hybrid heuristic algorithm proposal: In this stage, a hybrid heuristic algorithm for the multiobjective optimization of the problem was proposed and validated. This proposal included the following tasks:
 - Development of a hybrid heuristic algorithm for the multiobjective optimization of maintenance funds that considers, in an integrated manner, technical, economic and environmental aspects in the evaluation of maintenance alternatives.
 - Experimental design for the calibration of the proposed hybrid heuristic algorithm.

- Calibration of the proposed hybrid heuristic algorithm.
 - Experimental design for the validation of the proposed hybrid algorithm.
 - Application and validation of the proposed hybrid heuristic algorithms considering the Chilean case study.
- Conclusions and opportunities for improvement: From the application of the proposed tool, several conclusions are derived that would enhance the management of infrastructure assets. Finally, the limitations of the proposed tool are identified. These limitations allow the identification of opportunities for improvement that could define future research and developments.

7.6 Conclusions, Recommendations and Future Research

Based on the results presented in this research, the main objective of this research has been fulfilled. This research has therefore developed a tool for the evaluation of maintenance alternatives and the heuristic multiobjective optimization that allows a more sustainable and efficient allocation of available resources for the maintenance of land transportation infrastructure. This tool has also been validated by its application to a case study involving the management of networks of urban pavements in Chile. This application has considered data from the project Fondef D09I1018 developed at Pontificia Universidad Católica de Chile study.

7.6.1 Fulfillment of research objectives

The development and validation of this tool for the evaluation of maintenance alternatives and the heuristic multiobjective optimization has achieved the specific objectives defined in this research:

- Analyze the efficiency of heuristic optimization algorithms to optimize the allocation of maintenance resources. From the application of these heuristics to an urban case, these algorithms were concluded to be inefficient when designing maintenance programs under technical and economic constraints.
- Develop and program a hybrid multiobjective optimization heuristic algorithm that evaluates the maintenance alternatives considering technical, economic and environmental aspects in an integrated manner. The validation of the proposed hybrid algorithm (GRASP-GLS-GFB) considering the Chilean case study resulted in more sustainable maintenance programs than those obtained with the heuristic algorithms based on a local search. In addition, the proposed hybrid algorithm require a lower computational time. Therefore, the proposed hybrid algorithm allows a more sustainable and computationally efficient management than the heuristic algorithms that are based on a local search.

To achieve these specific objectives, the following activities were developed:

- Propose indicators for the technical, economic and environmental evaluation of maintenance alternatives. These indicators are based, respectively, in effectiveness (measured in terms of the area bounded by the performance curve), CO₂ emissions and the actual cost of the maintenance program.

- Analyze approaches and optimization methods available for allocating resources and conservation in infrastructure networks, recommending the approach and methods suitable for different scenarios.
- Define the multiobjective optimization problem present in the sustainable allocation of maintenance funds, identifying the objective functions, variables, parameters and constraints of the problem.
- Define and develop a computational tool that integrates the sustainable evaluation of maintenance alternatives and the multiobjective heuristic optimization to solve the budget allocation problem.

It is worth mentioning that the results derived from this research have been submitted for publication in scientific journals and international conferences (Table 7-1).

The topics presented in the journal papers have dealt, firstly, with the review of the evaluation methods of maintenance alternatives (ID 1 in Table 7-1) and the optimization methods and approaches used to solve the budget allocation problem at a network level (ID 2 in Table 7-1). These articles are complemented by a study recommended for publication in an international journal, in which different methods for the integration of technical, economic and environmental evaluations are analyzed under a prioritization approach (ID 3 in Table 7-1). The hybrid algorithm proposed in this research is addressed in an article that is currently under review at a scientific journal (ID 4 in Table 7-1).

Presentations given at international conferences have introduced the framework of the optimization tool (ID 5 and 9 in Table 7-1) and preliminary applications of the tool (ID 6, 7 and 8 in Table 7-1).

Table 7-1: Publications derived from this research

ID	Title	Journal/Congress	Status
1	An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level	The Scientific World Journal	Published
2	Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management	Revista de la Construcción	Published
3	Sustainable pavement management: How to integrate economic, technical and environmental aspects in decision-making	Transportation Research Record and Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management (*)	Accepted for publication
4	Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid GRASP algorithm	Journal of Civil Engineering and Management	Sent for review
5	Herramienta de optimización heurística para la gestión de infraestructuras: aplicación a una red de pavimentos urbanos en Chile	11° Congreso Internacional Provia	Published
6	Application of simple and hybrid local search heuristics for the long-term optimization of pavement maintenance strategies at the network level	Transportation Research Board 93rd Annual Meeting	Published
7	Heuristic optimization model for infrastructure asset management	Advances in Artificial Intelligence	Published
8	Optimization and prioritization methods for pavement network management	Transportation Research Board 92nd Annual Meeting	Published
9	Modelo de optimización para la gestión del mantenimiento de una infraestructura de edificación	2° Congreso de enseñanza de las matemáticas en Ingeniería de Edificación	Published

(*) Presentation awarded as one of the “*Best presentation AISIM*”

SOURCE: Self elaboration

7.6.2 Research conclusions

The specific conclusions of this research are summarized as follows:

- Based on the evidence identified in the case study presented in chapter 5, the proposed tool improves the current maintenance management. With the identical budget, the proposed tool designed maintenance programs that increase the average network condition by up to 22% with a reduction in CO₂ emissions of 12%.
- Optimal programs consider a proactive maintenance policy. These programs are mainly based on preservation treatments that are applied when the pavement is still in good condition.
- The proposed tool improves the temporal planning of available maintenance resources. For the budget range explored in the case study, optimal solutions are more sensitive to budget reductions than to budget increases.
- The budget distribution over time is a key factor in the technical and environmental performance. Results in Section 5.5.2 show that, in the case study, a constant investment and a significant initial investment are more efficient than a low initial investment that increases over time.
- The proposed hybrid algorithm allows a more sustainable and computationally efficient management than the traditional heuristic algorithms. According to the validation scenarios discussed in Section 5.3, the proposed tool designed programs with an effectiveness 9% higher than the best heuristic algorithm, requiring a lower computational effort.
- Heuristic algorithms based on a local search are inefficient to solve the budget allocation problem because they must compare similar alternatives. The results presented in sections 4.3 and 5.3 show that these algorithms are able to efficiently explore the solution space when the alternatives

considered are continuous or generate small changes in the starting solution. This is the case of the successful application of the GFB algorithm presented by Tsunokawa et al. (2006), in which the thickness and time of the application of an asphalt overlay was optimized.

7.6.3 Practical recommendations

The research has identified the following practical recommendations for the management of land transport infrastructure assets:

- The integration of the environmental aspects to the traditionally considered (technical and economic) aspects enables a more sustainable allocation of maintenance resources. Based on the evidences identified in the application to the Chilean case study (Chapter 5), it can be concluded that the proposed tool allows to design, under the same budget constraints, optimal maintenance programs with a better technical performance and a lower environmental impact. The proposed tool enables a more sustainable management of the infrastructure network.
- Early pavement maintenance, when the pavement is still in good condition, allows a more efficient management in technical, economic and environmental terms. This recommendation is derived from the analysis of optimal maintenance programs presented in Chapter 5, which are based on a proactive maintenance policy.
- Based on the evidence shown by the results in section 5.4.3, the most efficient preservation treatments are fog and slurry seals for asphalt pavements and diamond grinding for concrete pavements. Regarding maintenance treatments, optimal solutions mainly considered the structural overlay for both asphalt and concrete pavements.

- The proposed tool allows the analysis of the technical, economic and environmental effects of different budget scenarios, enabling the infrastructure manager to make a better decision. Based on the scenarios discussed in Section 5.5, the base budget considered in the case study is concluded to be reasonably adequate to manage the network. On the one hand, a reduction of this budget would generate a substantial increase in CO₂ emissions and would also reduce the effectiveness and, consequently, the network level of service. On the other hand, the benefits of a budget increase are practically constant for increases between 5 and 15% of the budget, being significant for an increase of 20%.
- The benefits of using the proposed tool have been analyzed considering a real case study involving the management of a network of urban pavements in Chile. However, the real implementation of the proposed tool in pavement management system should be analyzed.
- Conducting a detailed analysis of the optimal maintenance programs obtained with the tool would be useful to define the optimal maintenance standards for different pavement sections. Maintenance standards are widely used in pavement management systems. These standards define the set of conservation activities applicable to a type of pavement during its life cycle. This sequential approach may not result in a global optimal solution. However, this approach has two advantages: to the ease of understanding and the incorporation of other aspects (such as social, political and institutional) in the selection of the assets to treat (prioritization).

7.6.4 Limitations

The limitations encountered in this research are detailed below. These limitations allow the definition of future research.

a) General limitations

- The proposed optimization tool is defined in a generic manner for the management of land transport infrastructure assets. However, the application of the tool is particularized to a case study dealing with the management of an urban pavement network in Chile.
- The proposed tool focuses on the optimal allocation of maintenance resources at the network level. This analysis considers different maintenance alternatives, but it does not consider the design stage.
- The proposed tool aims to optimize the allocation of maintenance resources. The tool also allows the study of the effect of different budget scenarios. However, complementing this analysis with a study of network needs would be useful. This would help to define the minimum budget required to maintain the network above a certain level of service. Comparing the results obtained with the holistic approach used in this study to the ones obtained under the sequential approach that are traditionally used in infrastructure management would also be useful.
- The proposed hybrid algorithm (GRASP-GLS-GFB) allows a more sustainable and computationally efficient allocation of resources than the explored traditional heuristic algorithms (GFB, SA, TA and GRASP). However, the overall benefits derived from the use of the proposed hybrid algorithm should be analyzed by comparing this method with other optimization methods employed in infrastructure management.
- The economic evaluation proposed in this paper compares, on the one hand, the costs of treatments with the available budget. On the other hand,

it accounts for the benefits of users through an indicator based of effectiveness, which is evaluated in terms of the area bounded by the performance curve and a minimum threshold condition. This assessment could be supplemented by a monetary evaluation of the social benefits derived from a better network condition.

- The environmental evaluation proposed in this paper only considers CO₂ emissions generated by the application of maintenance treatments. Whereas this approach allows the analysis of environmental benefits of applying environmental friendly treatments (e.g., recycling techniques), this method does not consider the increase in vehicle emissions generated by the pavement condition.
- This paper proposes to incorporate environmental considerations into traditionally technical and economic evaluations. Although this consideration is directed to derive a more sustainable management of infrastructure, it should be complemented with social, financial, political and institutional aspects to ensure the integration of all necessary aspects for the sustainable management of infrastructure.

b) Case study limitations

To analyze the computational capacity of the proposed tool, several considerations were drawn in its application to the Chilean case study. These considerations should be reviewed during the real application of the proposed tool.

- The criteria used to define the pavement performance curves for the primary and secondary network should be reviewed with data from structural pavement capacity tests and traffic counts.
- This research has considered pavement to continue to deteriorate with the identical performance curve when the maintenance treatments are applied.

7.6.5 Future research

Given the limitations of this study, the following future research is proposed:

- Implementation and validation of the proposed tool to other urban pavement networks and other land transportation infrastructure.
- Incorporation of other phases of the infrastructure life-cycle in the optimization process. This would allow the evaluation of different alternatives in the design phase of infrastructure.
- Incorporation of a module for the analysis of network needs. This would allow a study of the budget required to maintain the network above a certain level of service.
- Incorporation of a probabilistic analysis to consider the variability of the data considered in the optimization.
- Comparison of maintenance programs obtained with the heuristic optimization tool and those obtained under a sequential approach.
- Comparison of the optimal maintenance programs designed with the proposed hybrid algorithm (GRASP-GLS-GFB) and those obtained with other optimization methods employed in infrastructure management.
- Improvement of the methodology considered for the economic evaluation by quantifying social benefits and costs in monetary terms.
- Improvement of the methodology considered for the environmental evaluation. This improvement could consist of an update of the data, the consideration of vehicle emissions because of pavement condition and the incorporation of other environmental indicators (energy consumption, water consumption, etc.).
- Definition of a methodology to evaluate and integrate social, financial, political and institutional aspects to the technical, economic and

environmental aspects proposed in this research. The integration of these seven aspects in the infrastructure life-cycle would enable an overall sustainable infrastructure management.

- Development of indicators that, based on objective measures, would allow a better understanding of the results gained by a sustainable management by a non-specialized public.

Additionally, the following lines of research are proposed to overcome the limitations identified in the case study:

- Validation or development of performance models for the primary and secondary pavement network.
- Development of pavement performance curves to simulate the effect of applying different maintenance treatments.

8 REFERENCIAS

- AASHTO. (2006). *Asset Management Data Collection Guide*. AASHTO, Washington D.C., USA.
- AEC. (2012). *Necesidades de inversión en conservación: Las carreteras muestran síntomas evidentes de un peligroso deterioro*. Asociación Española de la Carretera, Madrid, España.
- Aguado, A., Caño, A., de la Cruz, M., Gómez, D., y Josa, A. (2012). «Sustainability Assessment of Concrete Structures within the Spanish Structural Concrete Code». *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2), 268-276.
- Ahmed, A., Labi, S., Li, Z., y Shields, T. (2013). «Aggregate and disaggregate statistical evaluation of the performance-based effectiveness of long-term pavement performance specific pavement study-5 (LTPP SPS-5) flexible pavement rehabilitation treatments». *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(2), 172-187.
- Alarcon, L. F., y Bastias, A. (1998). «Computer environment for modeling and evaluating strategic decisions». ASCE, Boston, MA, USA, 157-167.
- Alarcón, L., y Mourgues, C. (2002). «Performance Modeling for Contractor Selection». *Journal of Management in Engineering*, 18(2), 52-60.
- Amador-Jiménez, L. E., y Mrawira, D. (2009). «Roads Performance Modeling and Management System from Two Condition Data Points: Case Study of Costa Rica». *Journal of Transportation Engineering*, 135(12), 999-1007.
- Anagnostopoulos, K., y Koulinas, G. (2012). «Resource-Constrained Critical Path Scheduling by a GRASP-Based Hyperheuristic». *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(2), 204-213.
- ASCE. (2013). «ASCE 2013 Report Card for America's Infrastructure». <<http://www.infrastructurereportcard.org>> (feb. 20, 2015).
- Avilés Lorenzo, J. (2002). «Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BT. Efecto del tipo y contenido de betún». Ingeniería de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Baguley, C. J., Hils, B. L., Fletcher, J., y Odoki, J. B. (2003). *Road Accident Modelling for Highway Development and Management in Developing Countries: A Literature Review*. The Transport Research Laboratory, Berkshire, Reino Unido.
- Baladi, G. Y., Novak Jr., E. C., y Kuo, W.-H. (1992). «Pavement condition index - Remaining service life». *Pavement Management Implementation*, Atlanta City, NJ, USA, 63-90.
- Bastias, A., y Molenaar, K. (2005). «Classification and Analysis of Decision Support Systems for the Construction Industry». *Proceedings of the 2005 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, Cancun, Mexico, 1875-1885.
- Bennett, C. R., y Greenwood, I. D. (2004). *Modelling road users and environmental effects in HDM-4. Volume 7 of Highway Development and Management Series*. International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC, Paris.
- Bennett, C. R., y Paterson, W. D. (2000). *A guide for calibration and adaptation - Volume 5 of Highway Development and Management Series*. International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC.
- BID, (Banco Interamericano de Desarrollo). (2000). *Un nuevo impulso a la integración de la infraestructura regional en América del Sur*. Brasilia, Brasil.
- Birgisdóttir, H. (2005). «Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration». Technical University of Denmark.
- Bitumix. (2014). «Bitumix». <<http://www.bitumix.cl>> (nov. 27, 2014).

- Booz-Allen & Hamilton Inc. (1999). «California Life-Cycle Benefit/Cost Analysis Model (Cal-B/C)». <http://www.dot.ca.gov/hq/tpp/offices/eab/benefit_files/tech_supp.pdf> (abr. 26, 2013).
- BRE, (Building Research Establishment). (2014). «BREEAM». <<http://www.breeam.org/>> (feb. 17, 2014).
- Broten, M. (1996). *Local Agency Pavement Management Application Guide*. Washington State Dept. of Transportation, TransAid Service Center, Washington, USA.
- Browne, D., y Ryan, L. (2011). «Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies». *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3), 226-233.
- Cabrera, A. (2013). *Producción de asfaltos, aglomerantes y emulsiones: Estudio de mercado*. Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.
- Cafiso, S., Di Graziano, A., Kerali, H., y Odoki, J. (2002). «Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1816, 73-84.
- Caltrans, C. D. of T. (2009). *Maintenance technical advisory guide (MTAG)*. California, USA.
- Carey, W. N., y Irick, P. E. (1960). «The pavement serviceability performance concept». *Highway Research Board Bulletin* 250, 40-58.
- Černý, V. (1985). «Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm». *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), 41-51.
- Chamorro, A. (2004). «Implementación y validación de una tecnología para la inspección visual de pavimentos en Chile». Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Chamorro, A. (2012). «Development of a Sustainable Management System for Rural Road Networks in Developing Countries». PhD. Thesis, University of Waterloo, Canada.
- Chamorro, A., y Tighe, S. (2009). «Development of a Management Framework for Rural Roads in Developing Countries». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2093, 99-107.
- Chamorro, A., Tighe, S. L., Li, N., y Kazmierowski, T. (2010). «Validation and implementation of Ontario, Canada, network-level distress guidelines and condition rating». *Transportation Research Record*, 2153, 49-57.
- Chamorro, A., Tighe, S. L., Li, N., y Kazmierowski, T. J. (2009). «Development of distress guidelines and condition rating to improve network management in Ontario, Canada». *Transportation Research Record*, 2093, 128-135.
- Chan, C. Y., Huang, B., Yan, X., y Richards, S. (2010). «Investigating effects of asphalt pavement conditions on traffic accidents in Tennessee based on the pavement management system (PMS)». *Journal of Advanced Transportation*, 44(3), 150-161.
- Chan, P., y Tighe, S. L. (2010a). «Quantifying Pavement Sustainability in Economic and Environmental Perspective».
- Chan, P., y Tighe, S. L. (2010b). *Pavement Sustainability*. Ministry of Transportation, Ontario, Canada.
- Chan, S., Bennett, B., Lane, B., y Kazmierowski, T. (2012). «GreenPave: Ontario's Pavement Sustainability Rating System». Fredericton, Canada.
- Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., y Lee, W. (2011). «Pavement preservation: A solution for sustainability». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2235, 36-42.
- Chan, W., Fwa, T., y Tan, C. (1994). «Road Formulation». *Journal of Transportation Engineering*, 120(5), 693-709.
- Chan, W., Fwa, T., y Tan, J. Y. (2003). «Optimal Fund-Allocation Analysis for Multidistrict Highway Agencies». *Journal of Infrastructure Systems*, 9(4), 167-175.

- Chehovits, J., y Galehouse, L. (2010). «Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements». Newport Beach CA, USA.
- Chester, M. V., y Horvath, A. (2009). «Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains». *Environmental Research Letters*, 4(2), 1-8.
- Chootinan, P., Chen, A., Horrocks, M. R., y Bolling, D. (2006). «A multi-year pavement maintenance program using a stochastic simulation-based genetic algorithm approach». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(9), 725-743.
- Chou, J.-S., y Le, T.-S. (2011). «Reliability-based performance simulation for optimized pavement maintenance». *Reliability Engineering & System Safety*, 96(10), 1402-1410.
- Chowdhury, M. A., Garber, N. J., y Li, D. (2000). «Multiobjective Methodology for Highway Safety Resource Allocation». *Journal of Infrastructure Systems*, 6(4), 138-144.
- Cirilovic, J., Vajdic, N., Mladenovic, G., y Queiroz, C. (2014). «Developing cost estimation models for road rehabilitation and reconstruction: Case study of projects in Europe and central Asia». *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(3), 04013065.
- Cole, M. ., y Wood, T. J. (2014). «Effective use of chip seals in Minnesota». *TR News*, 290, 51-52.
- Correa, A. L., y Wong, B. (2001). «Concrete Pavement Rehabilitation Guide for Diamond Grinding». <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/diamond17007.cfm>> (feb. 25, 2014).
- Crespo del Río, R. (1991). «Sistemas de gestión de firmes 1: Equipos y técnicas de auscultación». *Rutas*, 23, 10-14.
- Cross, S. A., Chesner, W. H., Justus, H. G., y Kearney, E. R. (2011). «Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2227, 43-52.
- CSCE, (Canadian Society for Civil Engineering), CPWA, (Canadian Public Works Association), CCA, (Canadian Construction Association), y FCM, (Federation of Canadian Municipalities). (2012). *The Canadian Infrastructure Report Card*. Montreal, Canada.
- Delwar, M., y Papagiannakis, A. T. (2001). «Relative Importance of User and Agency Costs in Pavement LCCA». *Fifth International Conference on Managing Pavements*, Seattle Washington, USA.
- Dowland, K. A. (1993). «Some experiments with simulated annealing techniques for packing problems». *European Journal of Operational Research*, 68(3), 389-399.
- DRAE, (Diccionario de la Real Academia Española). (2001). *Diccionario de la lengua española*. Espasa Libros, España.
- Duarte, A., Martí, R., Resende, M. G. C., y Silva, R. M. A. (2014). «Improved heuristics for the regenerator location problem». *International Transactions in Operational Research*, 21(4), 541-558.
- Dueck, G., y Scheuer, T. (1990). «Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing». *Journal of Computational Physics*, 90(1), 161-175.
- Elbeltagi, E., Hegazy, T., y Grierson, D. (2005). «Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms». *Advanced Engineering Informatics*, 19(1), 43-53.
- European Commission. (2008). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Structural Funds, Cohesion Funds and Instrument for Pre-Accession*. European Commission: Directorate General Regional Policy., Luxemburgo, Bélgica.
- Faghih-Imani, A., y Amador-Jimenez, L. (2013). «Toward sustainable pavement management». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2366, 13-21.
- Farhan, J., y Fwa, T. (2012). «Incorporating Priority Preferences into Pavement Maintenance Programming». *Journal of Transportation Engineering*, 138(6), 714-722.

- FCM, (Federation of Canadian Municipalities), y CNRC, (Canadian National Research Council). (2003). *Timely preventive maintenance for municipal roads: A primer*. National guide to sustainable municipal infrastructure, Canada.
- Feighan, K. J., Shahin, M. Y., Sinha, K. C., y White, T. D. (1989). «A Sensitivity Analysis of the Application of Dynamic Programming to Pavement Management Systems». *Transportation Research Record*, 1215, 101-114.
- Feo, T. A., y Resende, M. G. C. (1989). «A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem». *Operations Research Letters*, 8(2), 67-71.
- Ferreira, A., Antunes, A., y Picado-Santos, L. s. (2002). «Probabilistic Segment-linked Pavement Management Optimization Model». *Journal of Transportation Engineering*, 128(6), 568-577.
- FHWA. (1999). *Asset Management Primer*. Federal Highway Administration, Washington D.C., USA.
- FHWA. (2002). «HERS-ST 2.0 Highway Economic Requirements System-State Version». U.S. Department of Transportation.
- FHWA. (2003). *Economic Analysis Primer*. U.S. Department of Transportation, FHWA, Office of Asset Management, Washington, D.C.
- FHWA. (2005). «Memo: Pavement Preservation Definitions». <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/preservation/091205.cfm>> (ene. 14, 2014).
- Flintsch, G. W., y Chen, C. (2004). «Soft Computing Applications in Infrastructure Management». *Journal of Infrastructure Systems*, 10(4), 157-166.
- Frangopol, D. M. (2011). «Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges». *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(6), 389-413.
- Fwa, T., y Chan, W. (1993). «Priority Rating of Highway Maintenance Needs by Neural Networks». *Journal of Transportation Engineering*, 119(3), 419-432.
- Fwa, T., Chan, W., y Hoque, K. Z. (2000). «Multiobjective Optimization for Pavement Maintenance Programming». *Journal of Transportation Engineering*, 126(5), 367-374.
- Fwa, T., Chan, W., y Tan, C. Y. (1996). «Genetic-algorithm programming of road maintenance and rehabilitation». *Journal of Transportation Engineering*, 122(3), 246-253.
- Fwa, T., y Farhan, J. (2012). «Optimal Multiasset Maintenance Budget Allocation in Highway Asset Management». *Journal of Transportation Engineering*, 138(10), 1179-1187.
- Gabriel, S., Ordóñez, J., y Faria, J. (2006). «Contingency Planning in Project Selection Using Multiobjective Optimization and Chance Constraints». *Journal of Infrastructure Systems*, 12(2), 112-120.
- Gaete, R. (1994). «Análisis Técnico y Económico de Acciones de Conservación en Pavimentos Asfálticos.» Tesis Título de Magíster en Ciencias de la Ingeniería., Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Gaete, R., de Solminihac, H., y Echeverría, G. (1988). «Estudio de la resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos en Chile». *Revista de Ingeniería de Construcción*, 4, 41-76.
- Gao, L., Xie, C., Zhang, Z., y Waller, S. T. (2012). «Network-Level Road Pavement Maintenance and Rehabilitation Scheduling for Optimal Performance Improvement and Budget Utilization». *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(4), 278-287.
- Gao, L., y Zhang, Z. (2008). «Robust Optimization for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2084(-1), 55-61.
- De la Garza, J. M., Akyildiz, S., Bish, D. R., y Krueger, D. A. (2011). «Network-level optimization of pavement maintenance renewal strategies». *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 699-712.

- Geoffroy, D. N. (1996). *NCHRP Synthesis 223: Cost-effective preventive pavement maintenance*. Transportation Research Board of the National Academies., Washington, DC, USA.
- Giustozzi, F., Crispino, M., y Flintsch, G. (2012). «Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(4), 409-419.
- Giustozzi, F., Flintsch, G., y Crispino, M. (2011). «Environmental analysis of preventive maintenance treatments on road pavements». *International Conference on Managing Pavement Assets*, Santiago, Chile.
- Golroo, A., y Tighe, S. (2012). «Optimum Genetic Algorithm Structure Selection in Pavement Management». *Asian Journal of Applied Sciences*, 5(6), 327-341.
- Gómez-López, D., del Caño, A., y de la Cruz, M. P. (2013). «Early estimation of the sustainability level of concrete structures, in the framework of the EHE-08 spanish code». *Informes de la Construcción*, 65(529), 65-76.
- Gonzalez, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B., y Alabaster, D. (2011). «Strength and Deformational Characteristics of Foamed Bitumen Mixes under Suboptimal Conditions». *Journal of Transportation Engineering*, 137(1), 1-10.
- Gosse, C., Smith, B., y Clarens, A. (2013). «Environmentally Preferable Pavement Management Systems». *Journal of Infrastructure Systems*, 19(3), 315-325.
- Gransberg, D. (2010). *NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing, a synthesis of highway practices*. Transportation Research Board of the National Academies., Washington D.C., USA.
- Gransberg, D., y James, D. M. . (2005). *NCHRP Synthesis 342: Chip seal best practices*. Transportation Research Board of the National Academies., Washington D.C., USA.
- Gutiérrez-Bolivar, O., y Achútegui, F. (2003). *Desarrollo Práctico de los Sistemas de Gestión de Firmes*. CEDEX, Centro de Estudios de Carreteras, Madrid, España.
- Haas, R., Hudson, W. R., y Zaniewski, J. P. (1994). *Modern Pavement Management*. Krieger Pub Co.
- Haas, R., Tighe, S. L., y Cowe Falls, L. (2006). «Determining return on long-life pavement investments». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1974, 10-17.
- Hajek, J., y Bradbury, A. (1996). «Pavement performance modeling using Canadian strategic highway research program bayesian statistical methodology». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1524, 160-170.
- Halles, F., Thenoux, G., y González, Á. (2013). «Stiffness Evolution of Granular Materials Stabilized with Foamed Bitumen and Cement». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2363, 105-112.
- Hall, K., Correa, C., Carpenter, S., y Elliott, R. (2003). «Guidelines for Life-Cycle Cost Analysis of Pavement Rehabilitation Strategies». *Proceeding of 82st Transportation Research Board Annual Conference*. Washington, DC, USA.
- Harper, C. M., Molenaar, K. R., Anderson, S., y Schexnayder, C. (2014). «Synthesis of performance measures for highway cost estimating». *Journal of Management in Engineering*, 30(3), 04014005.
- Hayashi, Y., y Morisugi, H. (2000). «International comparison of background concept and methodology of transportation project appraisal». *Transport Policy*, 7(1), 73-88.
- Hayes, R., Metje, N., Chapman, D. N., y Rogers, C. D. F. (2012). «Sustainability assessment of UK streetworks». *Proceedings of the ICE - Municipal Engineer*, 165(4), 193-204.
- Hicks, R. G., Seeds, S. B., y Peshkin, D. G. (2000). *Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements*. FHWA, Washington, D.C., USA.

- Holt, C., Barnes, C., Sullivan, P., y O'Toole, L. (2009). «Full depth reclamation of roads using portland cement». Vancouver, Canada.
- HRB, H. R. B. (1962). *The AASHO road test: Report 5 - Pavement Research*. National Research Council, Washington D.C., USA.
- Huang, Y., Bird, R., y Bell, M. (2009a). «A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 197-204.
- Huang, Y., Bird, R., y Heidrich, O. (2009b). «Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements». *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283-296.
- Huang, Y., Hakim, B., y Zammataro, S. (2013). «Measuring the carbon footprint of road construction using CHANGER». *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 590-600.
- Hudson, W. R., y Haas, R. (1995). «What are the true costs and benefits of pavement management?». *Transportation Research Board Conference Proceedings*.
- Hudson, W. R., Uddin, W., y Haas, R. (1997). *Infrastructure Management: Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation and Renovation*. McGraw-Hill Professional Publishing.
- Ilustre Municipalidad de Santiago, y Pehuenche, C. L. (2012). *Contrato a serie de precios unitarios. Trabajos de pavimentación y reparaciones de aceras, calzadas y trabajos complementarios en calles y espacios públicos de la comuna de Santiago y/o en sectores administrados por la I. Municipalidad de Santiago*. Santiago, Chile.
- INE, (Instituto Nacional de Estadísticas de Chile). (2014). *Medio ambiente. Informe anual 2012*. Santiago, Chile.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: Mitigation of climate change. Disclaimer contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. (B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, y L. A. Meyer, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA.
- IRF. (2010). *IRF World Road Statistics 2010*. Geneva, Switzerland.
- Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., y Bhuiyan, M. A. (2015). «Optimization approach of balancing life cycle cost and environmental impacts on residential building design». *Energy and Buildings*, 87, 282-292.
- ISO, (International Standard Organisation). (2006). *Environmental Management-Life Cycle Assessment: Principles and Framework*. ISO14040:2006, Geneva.
- Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., y Canteras-Jordana, J. C. (2014a). «A review of application of multi-criteria decision making methods in construction». *Automation in Construction*, 45, 151-162.
- Jato-Espino, D., Rodriguez-Hernandez, J., Andrés-Valeri, V. C., y Ballester-Muñoz, F. (2014b). «A fuzzy stochastic multi-criteria model for the selection of urban pervious pavements». *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6807-6817.
- Kalembo, C., Jeihani, M., y Saka, A. (2012). «Evaluation of the impact of pavement roughness on vehicle gas emissions in Baltimore County». Washington DC, USA.
- Karan, M. A., Christison, T. J., Cheetham, A., y Berdahl, G. (1983). «Development and implementation of Alberta's pavement information and needs system». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 938, 11-20.
- Karmellos, M., Kiprakis, A., y Mavrotas, G. (2015). «A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies». *Applied Energy*, 139, 131-150.
- Kemp, R. (2005). «Is America on the road to ruin?». *Public Works*, 136(8), 21-22.

- Kerali, H., McMullen, D., y Odoki, J. (2006). *Overview of HDM-4 - Volume 1 of Highway Development Management Series*. International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC, Paris.
- Khurshid, M. B., Irfan, M., Ahmed, A., y Labi, S. (2014). «Multidimensional benefit-cost evaluation of asphaltic concrete overlays of rigid pavements». *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(6), 792-810.
- Khurshid, M. B., Irfan, M., y Labi, S. (2009). «Comparison of methods for evaluating pavement interventions: Evaluation and case study». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2108, 25-36.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C. D., y Vecchi, M. P. (1983). «Optimization by simulated annealing». *Science*, 220(4598), 671-680.
- Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M. G., Sánchez Blanco, V., y Del Val, M. A. (2004). *Ingeniería de carreteras*. McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid, España.
- Labi, S., Lamptey, G., y Kong, S. (2007). «Effectiveness of Microsurfacing Treatments». *Journal of Transportation Engineering*, 133(5), 298-307.
- Labi, S., y Sinha, K. (2003). *The effectiveness of maintenance and its impact on capital expenditures*. Joint Transportation Research Program, Indiana. Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, Indiana, USA.
- Laguna, M., Feo, T. A., y Elrod, H. C. (1994). «A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for the Two-Partition Problem». *Operations Research*, 42(4), 677 - 687.
- Laguna, M., y Martí, R. (1999). «GRASP and path relinking for 2-layer straight line crossing minimization». *INFORMS Journal on Computing*, 11(1), 44-52.
- Len y Asociados Ingenieros Consultores, Ltda. (2006). *Actualización de la Metodología para la Estimación de los Costos de Operación Vehicular*. Santiago, Chile.
- Liao, T. W., Egbelu, P. J., Sarker, B. R., y Leu, S. S. (2011). «Metaheuristics for project and construction management - A state-of-the-art review». *Automation in Construction*, 20(5), 491-505.
- Lundy, M., y Mees, A. (1986). «Convergence of an annealing algorithm». *Mathematical Programming*, 34(1), 111-124.
- Lyu, M., Dong, Z., y Lai, Y. (2015). «Dynamic multiobjective optimization of a compressor-driven adsorption system by iterative dynamic programming». *Heat Transfer Research*, 46(4), 369-382.
- Mallela, J., y Sadasivam, S. (2011). *Work zone road user costs*. FHWA (Federal Highway Administration), Washington, D.C.
- Marler, R. T., y Arora, J. S. (2004). «Survey of multi-objective optimization methods for engineering». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395.
- Marler, R. T., y Arora, J. S. (2010). «The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6), 853-862.
- Martí, J. V., Gonzalez-Vidosa, F., Yepes, V., y Alcalá, J. (2013a). «Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing». *Engineering Structures*, 48, 342-352.
- Martínez, F. J., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., y Yepes, V. (2010). «Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections». *Computers and Structures*, 88(5-6), 375-386.
- Martí, R. (2003). «Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria». *Matemàtiques*, 1(1), 3-62.
- Martí, R., Campos, V., Resende, M. G. C., y Duarte, A. (2015). «Multiobjective GRASP with Path Relinking». *European Journal of Operational Research*, 240(1), 54-71.
- Martí, R., Gallego, M., Duarte, A., y Pardo, E. G. (2013b). «Heuristics and metaheuristics for the maximum diversity problem». *Journal of Heuristics*, 19(4), 591-615.

- McFarland, W. F., Memmott, J. L., y Chui, M. K. (1993). *Microcomputer evaluation of highway user benefits*. National Cooperative Highway Research Program, Texas, USA.
- Medina, J. R. (2001). «Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing». *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127(4), 213-221.
- Meneses, S., y Ferreira, A. (2013). «Pavement maintenance programming considering two objectives: maintenance costs and user costs». *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 206-221.
- Meneses, S., y Ferreira, A. (2015). «Flexible pavement maintenance programming considering the minimisation of maintenance and rehabilitation costs and the maximisation of the residual value of pavements». *International Journal of Pavement Engineering*, In press, 1-16.
- Mestria, M., Satoru Ochi, L., y de Lima Martins, S. (2013). «GRASP with path relinking for the symmetric Euclidean clustered traveling salesman problem». *Computers & Operations Research*, 40(12), 3218-3229.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., y Teller, E. (1953). «Equation of State Calculations by Fast Computing Machines». *The Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1092.
- Miller, J. S., y Bellinger, W. Y. (2003). *Distress identification manual for the long-term pavement performance program*. Federal Highway Administration (FHWA), USA.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2014). *Precios sociales para la evaluación social de proyectos*. Ministerio de Desarrollo Social, Santiago, Chile.
- Ministerio de Fomento. (2011). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*. Ministerio de Fomento de España, Madrid, España.
- Ministerio de Fomento. (2012). *Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado*. Gobierno de España, Madrid, España.
- MINVU, (Ministerio de Urbanismo y Vivienda). (2008a). *Diagnostico Vial - Región Metropolitana, Cobertura y Déficit de Pavimentación*. Unidad de Pavimentación. Santiago, Chile.
- MINVU, (Ministerio de Urbanismo y Vivienda). (2008b). *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*. Santiago, Chile.
- Mizusawa, D. (2009). *Road Management Commercial Off The Shelf Systems Catalog*. Washington D.C., USA.
- Moazami, D., Behbahani, H., y Muniandy, R. (2011). «Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic». *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12869-12879.
- Molenaar, K. R., y Navarro, D. (2011). «Key performance indicators in highway design and construction». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Record, 2228, 51-58.
- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile). (2010). *Instructivo de Inspección Visual de Caminos Pavimentados*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Santiago, Chile.
- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile). (2012a). *Evaluación técnica económica de la red vial pavimentada*. Departamento de Gestión Vial. Subdirección de Desarrollo. Dirección de Vialidad, Santiago, Chile.
- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile). (2012b). *Proposiciones de acciones de mantenimiento y estado de la calzada y bermas para caminos pavimentados de la red vial nacional*. Departamento de Gestión Vial. Subdirección de Desarrollo. Dirección de Vialidad, Santiago, Chile.
- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile). (2012c). *Precios unitarios de acciones de conservación de caminos y carreteras*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Santiago, Chile.

- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile). (2013). *Costes de operaciones de conservación ejecutadas por administración directa*. Subdirección de mantenimiento. Departamento de conservación, Santiago, Chile.
- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile). (2014). *Manual de carreteras*. Santiago, Chile.
- MOP, (Ministerio Obras Públicas de Chile), y DDQ Consultants. (2008). *Modelos de deterioro de caminos no pavimentados*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Santiago, Chile.
- Moreno-Jiménez, J. M. (1996). «Metodología Multicriterio en el Plan Nacional de Regadíos». Documento Privado.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., y Rubio-Gámez, M. C. (2014). «Reuse of deconstructed tires as anti-reflective cracking mat systems in asphalt pavements». *Construction and Building Materials*, 53, 182-189.
- MTO. (2010). «GreenPave: Ontario's First Pavement Sustainability Rating System». *Road Talk – Ontario's Transportation Technology Transfer Digest*, 16(1).
- Muench, S. T., Anderson, J. L., y Söderlund, M. (2010). «Greenroads: A sustainability performance metric for roadways». *Journal of Green Building*, 5(2), 114-128.
- Muñoz, B., Romana, M. G., y Ordóñez, J. (2014). «Elección de tipo de muro en una autopista urbana en servicio por métodos de decisión multicriterio discretos. Aplicación a la M-40 en Madrid.» *Obras urbanas*, 45, 34-44.
- Murty, K. G. (2010). *Optimization for Decision Making - Linear and Quadratic Models*. International Series in Operations Research & Management Science, Springer, Berlin Heidelberg.
- NAMS, (National Asset Management Steering). (2006). *International Infrastructure Management Manual. Version 3.0*. Association of Local Government Engineering New Zealand Inc.
- Nathman, R. (2008). «PaLATE user guide, example exercise and contextual discussion». University of Delaware.
- Nathman, R., McNeil, S., y 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: Journal of the Transportation Research Board*, 2093, 40-49.
- Neves, L. C., y Frangopol, D. M. (2005). «Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges». *Reliability Engineering & System Safety*, 89(2), 185-198.
- Ng, M., Zhang, Z., y Travis Waller, S. (2011). «The price of uncertainty in pavement infrastructure management planning: An integer programming approach». *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1326-1338.
- NYS DOT. (2013). «GreenLITES: Recognizing Leadership in Transportation Environmental Sustainability». *New York State Department of Transportation*.
- Odoki, J. B., y Kerali, H. R. G. (2006). *Analytical Framework and Model Descriptions – Volume 4 of Highway Development and Management Series*. International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC, Paris.
- OECD, (Organization of Economic Cooperation and Development). (2001). *Asset management for the roads sector*. OECD Publishing, Paris, France.
- Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S. L., y Videla, C. (2015). «Development of performance models of urban pavements for network analysis». *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA, 1-19.
- Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S., y Videla, C. (2012a). *Desarrollo del Índice de Condición de Pavimentos Urbanos. Documento técnico proyecto Fondef D09I-1018*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

- Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S., y Videla, C. (2014a). «Calibration and Validation of Condition Indicator for Managing Urban Pavement Networks». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2455, 28-36.
- Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S., y Videla, C. (2014b). *Desarrollo de modelos de deterioro de pavimentos urbanos. Documento técnico proyecto Fondef D09I-1018*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Osorio, A., Mourgues, C., Tighe, S., Chamorro, A., y Videla, C. (2012b). *Review and evaluation of existing urban pavement management systems*. Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Ozbay, K., Parker, N., Jawad, D., y Riemer, C. (2003). *Guidelines for life cycle cost analysis*. New Jersey Department of Transportation, USA.
- Pareto, V. (1906). *Manuale di Economia Politica*. Societa Editrice, Milan.
- Parkin, S., Sommer, F., y Uren, S. (2003). «Sustainable development: understanding the concept and practical challenge*». *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability*, 156(1), 19-26.
- Patidar, V., Labi, S., Sinha, K. C., y Thompson, P. (2007). *NCHRP Synthesis 590: Multi-objective optimization for bridge management systems*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies., Washington D.C., USA.
- Payá, I. (2007). «Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado». Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- Payá, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidoso, F., y Hospitaler, A. (2008). «Multiobjective Optimization of Concrete Frames by Simulated Annealing». *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(8), 596-610.
- Pedrola, O., Ruiz, M., Velasco, L., Careglio, D., González de Dios, O., y Comellas, J. (2013). «A GRASP with path-relinking heuristic for the survivable IP/MPLS-over-WSON multi-layer network optimization problem». *Computers & Operations Research*, 40(12), 3174-3187.
- Pellecuer, L., Assaf, G. J., y St-Jacques, M. (2014). «Life cycle environmental benefits of pavement surface maintenance». *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(8), 695-702.
- Pellicer, E., Al-Shubbak, A., y Catalá, J. (2012). «Hacia una visión sistémica del ciclo de vida de la infraestructura». *Revista de Obras Públicas*, 159(3532), 41-48.
- Pérez-Martínez, M., Moreno-Navarro, F., Martín-Marín, J., Ríos-Losada, C., y Rubio-Gámez, M. C. (2014). «Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction». *Journal of Cleaner Production*, 65, 374-379.
- Peshkin, D. G., Hoerner, T. E., y Zimmerman, K. A. (2004). *Optimal Timing of Pavement Preventive Maintenance Treatment Applications. NCHRP Report 523*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA.
- Pittenger, D., Gransberg, D., Zaman, M., y Riemer, C. (2011). «Life-Cycle Cost-Based Pavement Preservation Treatment Design». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2235, 28-35.
- Queiroz, C., Haas, R., y Cai, Y. (1994). «National economic development and prosperity related to paved road infrastructure». *Transportation Research Record*, 1455, 147-152.
- Ramesh, S., Kannan, S., y Baskar, S. (2012). «Application of modified NSGA-II algorithm to multi-objective reactive power planning». *Applied Soft Computing*, 12(2), 741-753.
- Rao, A. R. M., y Shyju, P. P. (2010). «A Meta-Heuristic Algorithm for Multi-Objective Optimal Design of Hybrid Laminate Composite Structures». *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(3), 149-170.

- Reddy, B. B., y Veeraragavan, A. (2001). «Priority ranking model for managing flexible pavements at network level». *Journal of Indian Roads Congress*.
- Reggin, A., Shalaby, A., Emanuels, R., y St Michel, G. (2008). «Urban Considerations for Using Road Roughness to Manage Road Networks». *Seventh International Conference on Managing Pavement Assets*, Calgary, Alberta, Canada, 1-11.
- RMRC. (2013). «BE2ST-in-Highways | Recycled Materials Resource Center». <<http://rmrc.wisc.edu/be2st-in-highways/>> (abr. 26, 2013).
- Roberts, P., Shyam, K. C., y Rastogi, C. (2006). *Rural access index: A key development indicator*. The World Bank Group, Washington D.C., USA.
- Robinette, C., y Epps, J. (2010). «Energy, Emissions, Material Conservation, and Prices Associated with Construction, Rehabilitation, and Material Alternatives for Flexible Pavement». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2179, 10-22.
- Robinson, R., Danielson, U., y Snaith, M. S. (1998). *Road maintenance management: Concepts and systems*. Palgrave Macmillan, New York, USA.
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza universidad, Alianza, Madrid, España.
- De Rus, G., Betancor, O., y Campos, J. (2006). *Manual de evaluación económica de proyectos de transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Washington, D.C., USA.
- Ryus, P., Vandehey, M., Elefteriadou, L., Dowling, R. G., y Ostrom, B. K. (2010). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Saaty, T. L. (1990). «How to make a decision: The analytic hierarchy process». *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- SADC, (Southern African Development Community). (2003). *Low-volume Sealed Roads Guidelines*. Southern African Development Community, Gaborone, Botswana.
- Sampedro, A. (2011). *Desarrollo de una metodología de análisis de ciclo de vida integral específica para carreteras*. Cuadernos Tecnológicos de la PTC, Plataforma Tecnológica Española de la Carretera, Madrid, España.
- Sampedro, A. (2013). *Desarrollo de una metodología de análisis del coste de ciclo de vida para carreteras*. Cuadernos Tecnológicos de la PTC, Plataforma Tecnológica Española de la Carretera, Madrid, España.
- Sanchez-Alonso, E., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., y Rodriguez-Hernandez, J. (2011). «Sustainable asphalt mixes: Use of additives and recycled materials». *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 6(4), 249-257.
- Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Calzada-Perez, M. A., y Castro-Fresno, D. (2013). «Effect of warm additives on rutting and fatigue behaviour of asphalt mixtures». *Construction and Building Materials*, 47, 240-244.
- San-José Lombera, J.-T., y Garrucho Aprea, I. (2010). «A system approach to the environmental analysis of industrial buildings». *Building and Environment*, 45(3), 673-683.
- Santero, N., Loijos, A., y Ochsendorf, J. (2013). «Greenhouse gas emissions reduction opportunities for concrete pavements». *Journal of Industrial Ecology*, 17(6), 859-868.
- Santero, N., Masanet, E., y Horvath, A. (2010). *Life cycle assessment of pavements: a critical review of existing literature and research*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- Santero, N., Masanet, E., y Horvath, A. (2011). «Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review». *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 801-809.

- Santos, J., Ferreira, A., y Flintsch, G. (2015). «A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework». *International Journal of Pavement Engineering*, 16(3), 268-286.
- Sayers, M., Gillespie, T., y Queiroz, C. (1986). *The international road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements*. The World Bank, Washington D.C., USA.
- Schliesser, A., y Bull, A. (1992). *Caminos: Un Nuevo Enfoque para la Gestión y Conservación de Redes Viales*. Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), United Nations., Santiago, Chile.
- Schutte, I. (2008). *A user guide to road management tools*. The World Bank, Washington, DC, USA.
- Sevaux, M., Rossi, A., Soto, M., Duarte, A., y Martí, R. (2014). «GRASP with ejection chains for the dynamic memory allocation in embedded systems». *Soft Computing*, 18(8), 1515-1527.
- Shafizadeh, K., y Mannering, F. (2003). «Acceptability of Pavement Roughness on Urban Highways by Driving Public». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1860, 187-193.
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Springer, USA.
- Shah, Y. U., Jain, S. S., y Parida, M. (2014). «Evaluation of prioritization methods for effective pavement maintenance of urban roads». *International Journal of Pavement Engineering*, 15(3), 238-250.
- Shatnawi, S., Antonucci, C., y Hicks, R. G. (2005). «Development of the Caltrans Maintenance Technical Advisory Guide (MTAG)». *The first national workshop on pavement preservation for surfaced and unsurfaced roads*.
- Silvestre, R., Medel, E., García, A., y Navas, J. (2013a). «Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses». *Construction and Building Materials*, 45, 115-122.
- Silvestre, R., Medel, E., García, A., y Navas, J. (2013b). «Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis». *Materials and Design*, 50, 471-478.
- De Solminihaç, H. (2001). *Gestión de infraestructura vial*. Pontificia Universidad Católica De Chile, Santiago, Chile.
- De Solminihaç, H., Marquez, W., Halles, F., Chamorro, A., y Valdes, M. (2009). «Pavement and shoulder condition models developed with expert surveys: The Chilean application». *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(1B), 137-142.
- Souto, G. (2003). «El descuento social». *Hacienda Pública Española - Revista de Economía Pública*, Instituto Estudios Fiscales, 165(2), 99-126.
- Sunoil. (2014). «Sunoil: Botadero Autorizado de Residuos Inertes». <<http://sunoil.cl>> (nov. 27, 2014).
- TAC. (2013). *Pavement Asset Design and Management Guide*. Transportation Association of Canada, Ontario, Canada.
- Tan, S. G., y Cheng, D. (2012). «Using a Performance-Based Approach to Integrate Pavement Preservation into Pavement Management System: Case Study». *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*.
- Thenoux, G., y Garcia, G. (1999). «Estudio de técnicas de reciclado en frío: Primera parte». *Revista Ingeniería de Construcción*, (20), 5-14.
- Thenoux, G., González, Á., y Dowling, R. (2007). «Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile». *Resources, Conservation and Recycling*, 49(4), 325-339.

- La Torre, F., Ballerini, L., y Di Volo, N. (2002). «Correlation Between Longitudinal Roughness and User Perception in Urban Areas». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1806, 131-139.
- Torres-Machí, C., Yepes, V., Alcalá, J., y Pellicer, E. (2013). «Optimization of high-performance concrete structures by Variable Neighborhood Search». *International Journal of Civil Engineering*, 11(2), 90-99.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Kluwer Academic, Dordrecht; The Netherlands.
- Tsunokawa, K., Van Hiep, D., y Ul-Islam, R. (2006). «True Optimization of Pavement Maintenance Options with What-If Models». *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(3), 193–204.
- Uddin, W., Hudson, R. C. G., y Haas, R. (2013). *Public infrastructure asset management*. McGraw-Hill Education, New York.
- UN, (United Nations General Assembly). (2005). *2005 World Summit Outcome, Resolution A/60/1, adopted by the General Assembly on 15 September 2005*. New York, USA.
- Ureta, A. (1998). «Sistemas de Gestión Municipal para la Prevención de Accidentes de Tránsito». Tesis Título de Ingeniero Civil de Industrias con Diploma en Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- USGBC, (U.S. Green Building Council). (2014). «LEED | U.S. Green Building Council». <<http://www.usgbc.org/leed>> (feb. 17, 2014).
- Valenzuela, S., de Solminihaç, H., y Echaveguren, T. (2010). «Proposal of an integrated index for prioritization of bridge maintenance». *Journal of Bridge Engineering*, 15(3), 337-343.
- Videla, C., Chamorro, A., Mourgues, C., y Gillmore, R. (2010). *Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile*. Research project proposal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Voudouris, C., y Tsang, E. (1995). *Guided Local Search*. Department of Computer Science, University of Essex, Reino Unido.
- Voudouris, C., y Tsang, E. (1999). «Guided local search and its application to the traveling salesman problem». *European Journal of Operational Research*, 113(2), 469-499.
- Walls, J., y Smith, M. R. (1998). *Life-cycle cost analysis in pavement design: in search of better investment decisions*. FHWA, U.S. Department of Transportation., Washington, DC, USA.
- Wang, F., Zhang, Z., y Machemehl, R. (2003). «Decision-Making Problem for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1853, 21-28.
- Wang, H., Chen, Z., y Sun, L. (2013). «Pavement roughness evaluation for urban road management». *ICTE 2013*, American Society of Civil Engineers, Chengdu, China, 2709-2713.
- Wang, T., Lee, I.-S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.-B., y Kim, C. (2012). «Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance». *Journal of Cleaner Production*, 33, 86-96.
- WCED, (World Commission on Environment and Development). (1987). *Our common future*. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
- Wei, C., y Tighe, S. L. (2004). «Development of Preventive Maintenance Decision Trees Based on Cost-Effectiveness Analysis: An Ontario Case Study». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1866, 9-19.
- Weiland, C., y Muench, S. (2010). «Life-Cycle Assessment of Reconstruction Options for Interstate Highway Pavement in Seattle, Washington». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2170, 18-27.

- Willettts, R., Burdon, J., Glass, J., y Frost, M. (2010). «Environmental and sustainability impact assessment of infrastructure in the United Kingdom». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2158, 143-150.
- Wu, Z., y Flintsch, G. (2009). «Pavement Preservation Optimization Considering Multiple Objectives and Budget Variability». *Journal of Transportation Engineering*, 135(5), 305-315.
- Wu, Z., Flintsch, G., Ferreira, A., y Picado-Santos, L. (2012). «Framework for Multiobjective Optimization of Physical Highway Assets Investments». *Journal of Transportation Engineering*, 138(12), 1411-1421.
- Wu, Z., Groeger, J. L., Simpson, A. L., y Hicks, R. G. (2010). *Performance evaluation of various rehabilitation and preservation treatments*. FHWA, Office of Asset Management, Washington, D.C., USA.
- Yepes, V. (2002). «Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW». Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F., Alcalá, J., y Villalba, P. (2012). «CO2-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy». *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(3), 378-386.
- Yepes, V., y Medina, J. (2006). «Economic Heuristic Optimization for Heterogeneous Fleet VRPHESTW». *Journal of Transportation Engineering*, 132(4), 303-311.
- Yin, P.-Y., y Wang, T.-Y. (2012). «A GRASP-VNS algorithm for optimal wind-turbine placement in wind farms». *Renewable Energy*, 48, 489-498.
- Yoo, J., y Garcia-Diaz, A. (2008). «Cost-effective selection and multi-period scheduling of pavement maintenance and rehabilitation strategies». *Engineering Optimization*, 40(3), 205-222.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., y Kildiene, S. (2014). «State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods». *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165-179.
- Zhu, B., Zhang, X., y Fatikow, S. (2013). «A multi-objective method of hinge-free compliant mechanism optimization». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(3), 431-440.
- Zimmerman, K. A. (1995). *NCHRP Synthesis 222: Pavement Management Methodologies to Select Projects and Recommend Preservation Treatments*. Transportation Research Board of the National Academies., Washington D.C., USA.

ANEXOS

Anexo A: Conceptos básicos de la evaluación económica

En este anexo se introducen una serie de conceptos básicos en la evaluación económica de proyectos. Estos conceptos básicos permiten definir una serie de criterios necesarios para la evaluación económica de proyectos, los cuales son aplicables a la evaluación de alternativas de conservación de infraestructura vial. Estos criterios son:

- Establecer el periodo de análisis.
- Fijar un criterio para la consideración del valor residual del activo.
- Definir los índices económicos a considerar (inflación, tasa de descuento, impuestos, peajes, etc.)

En esta sección se discute la influencia de estas consideraciones así como recomendaciones recogidas en la literatura.

A.1. Periodo de análisis

El periodo de análisis corresponde con el horizonte temporal en el cual se cuantifican los costes y/o beneficios derivados de cada una de las alternativas (Walls y Smith 1998; FHWA 2003). Para que la comparación de alternativas resulte justa, debe considerarse un marco temporal lo suficientemente largo como para recoger las diferencias entre alternativas (Walls y Smith 1998; FHWA 2003).

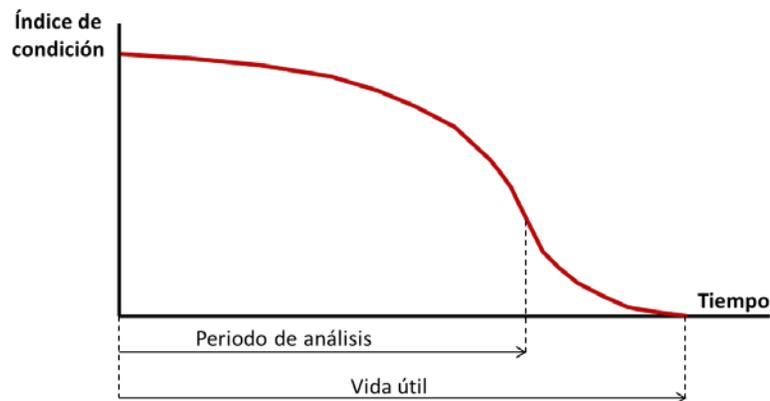
Uno de los criterios para definir el periodo de análisis consiste en analizar la vida útil de la infraestructura. La vida útil es el periodo de tiempo en el que la infraestructura provee un servicio adecuado en términos de condición, desempeño, capacidad funcional y costes de operación (Uddin et al. 2013). Sin embargo, en la evaluación de alternativas de conservación a nivel de red, las infraestructuras analizadas suelen presentar distinta vida útil (Hall et al. 2003; Pittenger et al. 2011). En estos casos, existen distintas alternativas para la elección del periodo de análisis: fijar el periodo de análisis igual al menor, mayor o mínimo común múltiplo de la vida útil de las

alternativas a evaluar; utilizar un periodo de análisis estandarizado o infinitamente largo; fijar el periodo de análisis en función de las necesidades de inversión de la organización; etc. (Hall et al. 2003; Pittenger et al. 2011). La elección del periodo de análisis condiciona en gran medida los resultados de la evaluación económica y, por tanto, la elección de la alternativa más adecuada. Así, por ejemplo, la elección de un periodo de análisis igual a la menor vida útil de las alternativas, puede no recoger las diferencias en el comportamiento de alternativas a largo plazo, penalizando aquellas alternativas que presentan mayores vidas útiles (Hall et al. 2003). A pesar de que existan diversas posibilidades, las alternativas deben compararse en el mismo horizonte temporal, por lo que debe considerarse un periodo de análisis común para todas las alternativas (Walls y Smith 1998).

Los primeros trabajos de evaluación económica de activos de transporte recomendaban que el periodo de análisis no comprometiera la fiabilidad de las previsiones de tráfico consideradas en el estudio, proponiendo periodos de análisis de 20-30 años (Haas et al. 1994). Más recientemente, la administración americana *Federal Highway Administration* (FHWA) ha recomendado que el periodo de análisis incluya, al menos, una rehabilitación para todas las alternativas, proponiendo periodos de análisis de entre 30 y 40 años para la evaluación de pavimentos en su etapa de diseño (FHWA 2003). En este sentido resulta interesante el estudio de Hayashi y Morisugi (2000), donde analizaron los criterios considerados para la evaluación económica de proyectos de transporte en distintos países (EEUU, Reino Unido, Francia, Alemania y Japón), concluyendo que los periodos de análisis empleados varían habitualmente entre 20 y 40 años. Sin embargo, algunos expertos (Haas et al. 2006) señalan que estos periodos de análisis pueden resultar insuficientes, ya que las decisiones actuales tienen consecuencias a largo plazo en la conservación de recursos, degradación ambiental y sostenibilidad. Por esta razón, proponen hacer la evaluar económica considerando tres periodos de análisis: corto plazo (25 años), medio plazo (50 años) y largo plazo (100 años).

A.2. Valor residual

El valor residual representa el valor remanente que tiene el activo al finalizar el periodo de análisis (Figura Anexo 1). Este valor debe considerarse en la evaluación de proyectos en los que el activo presenta una vida útil superior al periodo de análisis considerado en la evaluación (Walls y Smith 1998; Ozbay et al. 2003).



FUENTE: Elaboración propia

Figura Anexo 1: Valor residual del activo

El valor residual se compone de dos términos: el valor de reciclado de los elementos de la infraestructura y la vida de servicio remanente al final del periodo de análisis (Walls y Smith 1998). Si bien no existe un consenso general sobre cómo calcular el valor residual de una infraestructura, suele calcularse en base a la reducción del coste de rehabilitación debida a la contribución del estado del activo al final del periodo de análisis (Walls y Smith 1998; Hall et al. 2003).

A.3. Índices económicos

La evaluación económica de proyectos requiere la consideración de distintos índices económicos. En esta sección se revisan estos índices y se analiza su consideración en la evaluación económica de proyectos de activos de transporte terrestre.

Inflación

La inflación recoge el efecto del aumento de los precios a lo largo del tiempo. Este índice permite convertir unidades monetarias de un año a su cantidad equivalente en otro año, de forma que los bienes adquiridos en ambas fechas son los mismos. En la evaluación económica de proyectos no suele tenerse en cuenta el efecto de la inflación (Haas et al. 1994; Walls y Smith 1998; FHWA 2003). Algunas razones que apoyan este enfoque son (Haas et al. 1994):

- La dificultad de estimarla en tiempos futuros añadiría incertidumbre en la evaluación resultando más beneficiosos aquellos proyectos con altos niveles de inversión al comienzo del proyecto
- Si se considerase la inflación, las magnitudes de costes y beneficios incrementarían en el tiempo, mientras que su magnitud real sería la misma.
- Su consideración no garantiza que el resultado de la evaluación económica sea más fiable o lleve a la elección de la mejor solución posible.

Una vez finalizada la evaluación económica de alternativas, deberá realizarse un análisis presupuestario de los requerimientos de flujo de caja del proyecto. En este análisis financiero, posterior a la evaluación económica, sí se tendrá en cuenta el efecto de la inflación, así como de otros índices asociados a conceptos tales como impuestos, préstamos, etc. (Haas et al. 1994).

Tasa de descuento

La tasa de descuento refleja el efecto del tiempo en el coste de oportunidad de una inversión (FHWA 2003). Su valor teórico se obtiene deduciendo la inflación a la tasa de interés que el mercado aplica a los préstamos de la administración prestataria (FHWA 2003). Puesto que estas previsiones son desconocidas a la hora de evaluar una inversión, su valor debe estimarse previamente a la evaluación. En la evaluación social de proyectos, propia de inversiones públicas, esta tasa se denomina tasa de descuento social (Souto 2003).

Los valores utilizados habitualmente en proyectos de infraestructura de transporte terrestre, varían entre 3 y 8% (Hayashi y Morisugi 2000; Haas et al. 2006). En Estados Unidos esta tasa ronda, históricamente, entre 3-5 % (Walls y Smith 1998; FHWA 2003), si bien la U.S. Office of Management and Budget publica las tasas de descuento a aplicar en función del periodo de evaluación de la inversión. En Chile, el Ministerio de Desarrollo Social establece una tasa de descuento del 6% para la evaluación de proyectos sociales (Ministerio de Desarrollo Social 2014). A nivel europeo, la Comisión Europea propone una tasa de descuento social de entre 3,5 y 5,5% para la evaluación de proyectos (European Commission 2008).

Otros índices

Por razones análogas a las expuestas en el análisis de la inflación, la evaluación económica de proyectos de infraestructura de transporte tampoco deben incluir índices como: depreciación, pago de intereses, impuestos, peajes, etc. (FHWA 2003). En el caso de la depreciación o el pago de intereses, el valor equivalente de estos conceptos ya se recoge al aplicar la tasa de descuento a los costes de la administración. De forma análoga, tampoco deben incluirse los impuestos y peajes, ya que su efecto está reflejado en otros términos incluidos en el análisis económico (tiempo de viaje, seguridad, coste de operación vehicular...).

Anexo B: Formulación matemática de indicadores económicos

$$VAN = \sum_{n=1}^{AP} B_n \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^n + SV \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^{AP} - CI - \sum_{j=1}^k M_j \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^{nj} \quad (\text{A. 1})$$

$$CAE = \left(CI + \sum_{j=1}^k M_j \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^{nj} \right) \cdot \left(\frac{i \cdot (1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \right) \quad (\text{A. 2})$$

$$CI + \sum_{j=1}^k M_j \cdot \left(\frac{1}{1+TIR}\right)^{nj} = \sum_{n=1}^{AP} B_n \cdot \left(\frac{1}{1+TIR}\right)^n + SV \cdot \left(\frac{1}{1+TIR}\right)^T \quad (\text{A. 3})$$

$$BCR = \frac{\sum_{n=1}^{AP} B_n \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^n}{CI + \sum_{j=1}^k M_j \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^{nj} - SV \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^T} \quad (\text{A. 4})$$

$$ECR = \frac{\text{Efectividad}}{CI + \sum_{j=1}^k M_j \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^{nj} - SV \cdot \left(\frac{1}{1+i}\right)^T} \quad (\text{A. 5})$$

Donde:

CI = Coste Inicial

k = N° actividades de conservación

Mj = Coste de actividad j

Bn = Beneficios año n

n = Año dentro período de análisis

i = Tasa de descuento

nj = Año de aplicación tratamiento j

SV = Valor residual

T = Período de Análisis

Anexo C: Idoneidad de un indicador basado en efectividad para el caso de estudio

En este anexo se analiza la idoneidad de utilizar un indicador basado en efectividad para la evaluación económica de alternativas de conservación en redes de pavimentos urbanos. Para ello se realiza un análisis en detalle de los costes y beneficios a considerar en la evaluación. Este análisis se realiza en base a dos criterios:

- **Aplicabilidad:** Bajo este criterio se estudia en qué medida el coste o beneficio analizado es susceptible de variar con el estado del pavimento al llevar a cabo una operación de conservación. Se determina así si el concepto analizado (coste o beneficio) es aplicable en la evaluación de alternativas de conservación de pavimentos urbanos.
- **Cuantificación:** Para aquellos costes y beneficios que han sido identificados en la primera fase como aplicables en el caso de estudio, se analiza la idoneidad de una evaluación en términos monetarios. Para ello, se estudia la variabilidad de cada concepto (coste o beneficio) respecto a otros factores existentes en el caso urbano, como puede ser la congestión o la presencia de intersecciones. Si la variabilidad en la cuantificación económica derivada de la condición del pavimento es muy inferior a la variabilidad derivada de otros factores (Figura Anexo 2), puede concluirse que la cuantificación económica no es un método adecuado y sería más adecuada una cuantificación en términos de efectividad.



FUENTE: Elaboración propia

Figura Anexo 2: Variabilidad en la cuantificación económica en el caso urbano

C.1. Costes de la administración

Si bien algunos de los costes de la administración (adquisición de terrenos y construcción) serían aplicables únicamente en el caso de construir nuevos tramos en la red, puede concluirse que los costes de la administración varían según la alternativa de conservación elegida y, por lo tanto, deben incluirse en el caso de estudio. Estos costes son de cuantificación directa y fácilmente expresables en términos económicos.

C.2. Efecto sobre los usuarios en operación normal

Accidentes en operación normal

En el caso de carreteras interurbanas, existen estudios que concluyen que la condición del pavimento afecta de forma significativa en la frecuencia de accidentes. Así, por ejemplo, el estudio de Chan et al. (2010) concluye que tanto la regularidad superficial (con valores superiores a 1.5m/km) como el *Pavement Serviceability Index* (PSI) aumentan de forma significativa la frecuencia de accidentes.

En el caso urbano, por el contrario, se detectan otros factores más determinantes en la ocurrencia de accidentes que el estado del pavimento. Estudios realizados en Australia, Suecia e Inglaterra (Baguley et al. 2003), concluyen que la ocurrencia de accidentes en el caso urbano no son función del deterioro del pavimento sino de otros factores como el tipo de vía, velocidad, señalización, etc. Conclusiones similares se han obtenido en estudios realizados en la ciudad de Santiago (Chile), en los que se identifica la señalización como el principal factor en los accidentes urbanos, producidos en el 76% de los casos, en intersecciones (Ureta 1998).

Se puede concluir, por lo tanto, que la ocurrencia de accidentes no es susceptible de variar significativamente con el estado del pavimento, ya que en el caso urbano existen otros factores con una incidencia más significativa. Por lo tanto, se

recomienda no incluir el coste de los accidentes en operación normal en la evaluación económica del caso de estudio.

Tiempo de viaje (TV) en operación normal

En la literatura se encuentran estudios que indican que la velocidad y, por tanto, el tiempo de viaje no varían significativamente con el cambio de estado del pavimento (Gaete 1994; Walls y Smith 1998).

Sin embargo, estudios realizados por el Banco Mundial y recogidos en el sistema de gestión HDM-4, sí consideran que el estado del pavimento incide en la velocidad de circulación (Odoki y Kerali 2006). En el cálculo de la velocidad de circulación, el HDM-4 considera dos situaciones: flujo libre y flujo congestionado. En el caso de flujo libre, la velocidad de circulación viene determinada por la menor de cinco velocidades determinadas por: potencia del vehículo, capacidad de frenado en pendientes de descenso, curvatura de la vía, regularidad superficial del pavimento y actitud del conductor. Bajo esta consideración resulta interesante evaluar el valor de regularidad superficial que condicionaría la velocidad de un vehículo circulando en zona urbana. Para ello se utiliza la formulación propuesta en el HDM-4 (Odoki y Kerali 2006) y su calibración para Chile (Len y Asociados Ingenieros Consultores, Ltda. 2006), en la que se relaciona la velocidad de circulación con la regularidad superficial del pavimento (Ecuación (A. 6)) y se determina a partir de qué valor de IRI, un vehículo debe circular por debajo de la velocidad máxima en zonas urbanas (60 km/h).

$$V_{\text{rugosidad}} (m/s) = \frac{157,8}{IRI} \quad (\text{A. 6})$$

A partir de esta relación se obtiene que, en flujo libre, la regularidad superficial del pavimento limita la velocidad de circulación en zonas urbanas para IRI superiores a 9,5 m/km. Comparando estos valores con los límites establecidos para pavimentos interurbanos, se observa que este valor triplica el umbral considerado por algunas agencias de transporte para la rehabilitación de pavimentos (3,5 m/km en el caso del

Washington State Department of Transportation, WSDOT) y el umbral considerado como de condición aceptable por la administración americana de carreteras (2,7 m/km en el plan estratégico establecido en 1998 por la FHWA) (Shafizadeh y Mannering 2003). De este análisis, se podría concluir que la condición del pavimento incide en el tiempo de viaje únicamente para valores muy altos y, por lo tanto, inaceptables de regularidad superficial.

Sin embargo, los valores analizados corresponden al caso interurbano, por lo que estas conclusiones no son directamente aplicables al caso urbano. De hecho, el caso urbano presenta unas peculiaridades que dificultan el uso del IRI como indicador de condición. Por ejemplo, la longitud de evaluación de los tramos en el caso urbano es inferior a la indicada en el experimento de evaluación de IRI diseñado por el Banco Mundial (100-150 m en el caso urbano frente a los 320 m de evaluación en el caso interurbano). Además, la velocidad de circulación para la toma de datos en el caso urbano es inferior a los 80 km/h indicados en el experimento interurbano. Estas peculiaridades, entre otras, hacen que los valores de IRI tomados en pavimentos urbanos sean muy superiores a los valores habituales en el caso interurbano y, por lo tanto, no resulte un indicador adecuado para el caso urbano (La Torre et al. 2002; Reggin et al. 2008). Este hecho se constata en los valores tomados en el caso urbano chileno como parte del proyecto Fondef (Tabla Anexo 1). La red de estudio presenta por tanto altos valores de regularidad superficial que son susceptibles de inducir mayores tiempos de viaje para usuarios circulando en operación normal.

Tabla Anexo 1: Valores de IRI tomados en pavimentos urbanos en Chile

Tipo de pavimento	Media (m/km)	Desviación Típica
Asfalto	8,5	4,9
Hormigón	8,3	2,3

FUENTE: Proyecto Fondef

Sin embargo, en el caso urbano existen otros condicionantes que, previsiblemente, generarán mayores efectos en el tiempo de viaje que la condición del pavimento. Uno

de estos condicionantes es la congestión. Utilizando de nuevo la formulación propuesta por el HDM-4 calibrado para Chile (Ecuación (A. 6)), resulta interesante comparar el efecto que tienen, en la velocidad de circulación, la regularidad superficial del pavimento y la congestión. Para ello se analiza qué valor de IRI provocaría una velocidad de circulación similar a la de un flujo congestionado. Teniendo en cuenta que el modelo del HDM-4 considera que en un flujo congestionado la velocidad de todos los vehículos es el 85% de la velocidad libre del vehículo más lento y considerando que, en una vía urbana el vehículo más lento circula a 50 km/h, se obtiene que para un IRI medio de 13,4 m/km, el efecto de la regularidad superficial es equiparable al efecto de la congestión. Por lo tanto se concluye que, para los valores de regularidad superficial admisibles en el caso urbano, el efecto sobre el tiempo de viaje es pequeño y despreciable frente al efecto de la congestión.

Por lo tanto, se concluye que el tiempo de viaje no es susceptible de variar de forma significativa entre alternativas de conservación y en consecuencia, no debe considerarse en la evaluación económica del caso de estudio.

Costes de operación vehicular (COV) en operación normal

La mayoría de los estudios realizados para evaluar los COV han sido desarrollados por el Banco Mundial, recogiendo en el HDM-4 los modelos para su evaluación en vías interurbanas (Hudson y Haas 1995; Bennett y Paterson 2000; Haas et al. 2006). Estudios de calibración del HDM-4 (Len y Asociados Ingenieros Consultores, Ltda. 2006) y guías de evaluación de costes para el diseño de pavimentos (Walls y Smith 1998) concluyen que el efecto de la regularidad superficial en los COV es importante para valores altos de IRI (superior a 2,7 m/km). En base a estos estudios, se puede concluir que el estado del pavimento incide en los COV debiendo, por tanto, ser considerados en la evaluación económica del caso de estudio.

Para analizar si la cuantificación económica resulta conveniente, debe estudiarse la variabilidad de los COV respecto a otros factores, como por ejemplo, la congestión.

Estudios del Banco Mundial para el desarrollo del HDM-4 (Bennett y Paterson 2000) concluyen que, a igualdad del resto de condiciones, el efecto de la congestión puede suponer un consumo de combustible cuatro veces superior al consumo máximo derivado de la regularidad superficial (valores obtenidos considerando valores por defecto del HDM-4 para camión mediano circulando a 50 km/h). En este sentido resulta también de interés el estudio de Delwar y Papagiannakis (2001), en el cual se analiza el efecto del tráfico y la regularidad superficial del pavimento en los valores de COV y TV. Si bien este estudio ha sido realizado en vías interurbanas, presenta conclusiones interesantes para el caso urbano. En el trabajo de Delwar y Papagiannakis (2001), se analizan dos escenarios de nivel de servicio (Ryus et al. 2010): nivel C (conducción estable, si bien muchos conductores empiezan a sentir restricciones para seleccionar su velocidad) y nivel E (flujo inestable con pequeños congestionamientos). Los costes (TV y $COV_{regularidad}$) se evalúan en dos tipos de vía a las que se les aplica tres alternativas de conservación (A-C) (Tabla Anexo 2).

Tabla Anexo 2: Efecto del tráfico en costes de usuarios

Vía	Tratamiento	Costes usuarios Nivel servicio C (k\$)		Costes usuarios Nivel servicio E (k\$)		% ($COV_{regularidad}$ /Total)	
		TV	$COV_{regularidad}$	TV	$COV_{regularidad}$	LOS C	LOS E
		1	A	83	878	3.107	1.391
1	B	99	903	3.721	1.429	90%	28%
2	C	350	1.344	1.941	1.910	79%	50%
2	B	330	995	1.833	1.414	75%	44%

NOTA: Costes expresados en miles de dólares americanos a valor presente de 1996

FUENTE: Adaptado de Delwar y Papagiannakis (2001)

A la vista de la Tabla Anexo 2, se observa que, en periodos circulación con altos niveles de servicio, los COV representan una proporción importante de los costes de los usuarios (entre un 75 y 91%). Sin embargo, en momentos de congestión, los costes debidos al tiempo de viaje empiezan a cobrar mucha más importancia,

reduciéndose significativamente (hasta valores de entre un 28 y 50%) la contribución de los COV debidos al estado del pavimento.

En base a las evidencias anteriores se puede concluir que el estado del pavimento incide en los COV y, por tanto, deben incluirse en el caso de estudio. Sin embargo, existen otros factores (ej. congestión) que tienen una influencia alta en el valor de los COV. Por lo tanto, la evaluación económica de los costes de los usuarios debidos al estado del pavimento es una información parcial del problema. De hecho, la importancia relativa de los COV debidos a la regularidad superficial respecto a los costes totales de los usuarios es muy sensible al nivel de servicio de la vía.

Por lo tanto, dado que los COV se calculan a partir de índices de estado del pavimento y que su evaluación en términos económicos precisa de una calibración local, parece recomendable que los COV se incluyan en la evaluación directamente a través de las curvas de comportamiento del pavimento, es decir, con métodos coste-efectividad. Este método considera de forma intrínseca las variaciones de los COV en función del índice de condición del pavimento sin precisar calibraciones de los modelos de evaluación.

C.3. Efecto sobre los usuarios en zonas de trabajo

Accidentes en zonas de trabajo

Los costes de accidentes en zonas de trabajo cuantifican la variación de la tasa de accidentes debido a la presencia de zonas de trabajo. Los datos necesarios para su evaluación en términos monetarios son: frecuencia, gravedad y coste unitario de los accidentes (Mallela y Sadasivam 2011).

Puesto que la presencia de zonas de trabajos incrementa la probabilidad de accidentes, la frecuencia de accidentes debido a trabajos suele obtenerse aplicando a las tasas habituales un factor multiplicador denominado factor de modificación de accidentes "*Crash Modification Factor*" (CMF). Algunos de los factores que afectan en el valor del CMF son: clase funcional de la vía, localización, volumen de tráfico,

estrategia de conservación, condiciones meteorológicas, etc. Sin embargo, hasta la fecha no existen valores de CMF estadísticamente aceptados, ya que los valores obtenidos presentan importantes variaciones en función de las características concretas de cada localización (Mallela y Sadasivam 2011).

Puesto que los accidentes en zonas de trabajo se calculan, tradicionalmente, a partir de los accidentes en operación normal y estos últimos se ha considerado que no varían significativamente con alternativas de conservación, se concluye que la evaluación económica de accidentes en zonas de trabajo no resulta adecuada para aplicarse en el caso de estudio.

Tiempo de viaje (TV) en zonas de trabajo

El coste por incremento de tiempo de viaje en zonas de trabajo se obtiene a partir de la multiplicación de los costes unitarios de tiempo de viaje por la demora inducida por los trabajos. La demora debida a operaciones de conservación puede estimarse a través de análisis de la capacidad de la vía y con herramientas de simulación del tráfico. Estas últimas suelen proporcionar estimaciones más precisas, si bien requieren análisis más detallados con un mayor requerimiento de datos (Mallela y Sadasivam 2011). Puesto que el efecto de las zonas de trabajo en los TV y COV se cuantifica de forma similar, su evaluación se analiza de forma conjunta en la sección siguiente.

Costes de Operación Vehicular (COV) en zonas de trabajo

Los costes de operación vehicular (COV) en zonas de trabajo incluyen conceptos similares a los incluidos en los costes por demora (Mallela y Sadasivam 2011). La evaluación de efectos a los usuarios (TV y COV) en zonas de trabajo requiere de los siguientes datos: demanda horaria de tráfico, composición del tráfico, configuración de la zona de trabajo, capacidad de circulación en la zona de trabajo, velocidad de circulación y las estrategias implementadas para satisfacer las necesidades de movilidad y seguridad en la zona de trabajos (Mallela y Sadasivam 2011).

A la vista de lo anterior se observa que la evaluación del impacto de las zonas de trabajo requiere datos con un alto nivel de detalle. Este nivel de detalle es más propio de un análisis a nivel de proyecto que para un análisis a nivel de red.

C.4. Externalidades

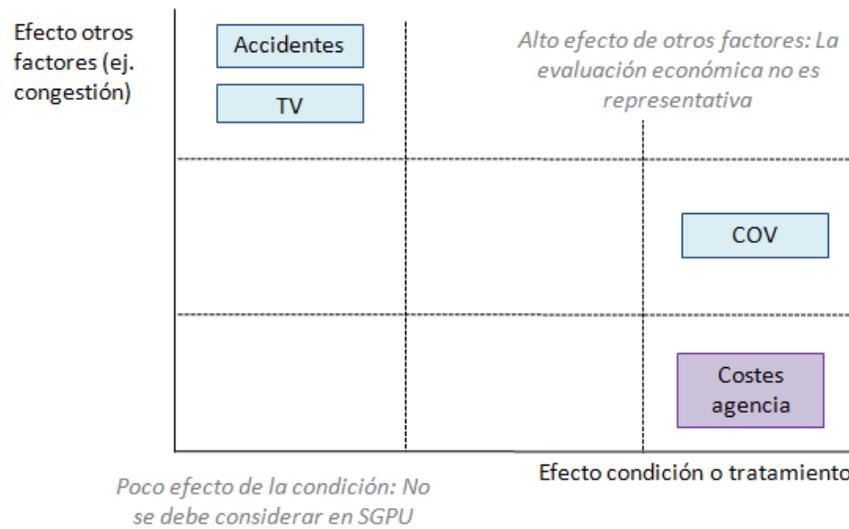
Tal y como se mencionó en el capítulo 2, la evaluación de externalidades es difícil de cuantificar en términos monetarios (FHWA 2003). Teniendo en cuenta que la práctica habitual en la evaluación de proyectos de transporte terrestre es excluir las externalidades de la evaluación económica, no se prevé considerarlos en el caso de estudio en términos monetarios.

C.5. Conclusiones

Tras el análisis de la aplicabilidad de los distintos costes y beneficios en la evaluación económica del caso de estudio, se presenta a continuación un resumen de las conclusiones obtenidas y la propuesta para la evaluación económica para el caso de estudio.

En la Figura Anexo 3 se muestra un resumen de la variabilidad de los distintos costes y beneficios analizados respecto al estado del pavimento y respecto a otros factores. En aquellos casos en los que la condición del pavimento o el efecto de aplicación de un tratamiento implique un efecto importante de los costes (eje horizontal de la Figura Anexo 3), se puede concluir que estos costes deben considerarse en la evaluación económica del caso de estudio.

El método de evaluación más adecuado para analizar estos costes puede estudiarse analizando el eje vertical del gráfico. Así, aquellos costes cuya cuantificación económica presente una variabilidad importante respecto a otros factores distintos de la condición del pavimento (ej. congestión), son susceptibles de ser cuantificados mediante un método de coste-efectividad.



FUENTE: Elaboración propia

Figura Anexo 3: Variabilidad de costes respecto a la condición y otros factores

A la vista de la Figura Anexo 3, se observa que los COV en operación normal son los únicos costes de usuarios con alta variabilidad respecto a la condición del pavimento y baja variabilidad con otros factores. Por lo tanto, su evaluación económica resulta significativa y debería incluirse este coste en el caso de estudio. Sin embargo, tal y como se expuso en secciones anteriores, su evaluación en términos económicos precisa de una calibración local. Por tanto, parece recomendable que los COV en operación normal se incluyan en la evaluación a través de las curvas de comportamiento del pavimento, es decir, con un análisis coste-efectividad. Este indicador considera de forma intrínseca las variaciones de los COV en operación normal en función de la condición del pavimento en el tiempo sin precisar calibraciones de la evaluación en términos monetarios.

Respecto a los efectos sobre los usuarios en zonas de trabajo, se concluye que los modelos de evaluación revisados requieren gran cantidad de datos resultando, por tanto, un análisis más propio para una gestión a nivel de proyecto que para una gestión a nivel de red. En consecuencia, el análisis económico propuesto para la evaluación económica de alternativas de conservación en el caso de estudio es el análisis coste-efectividad (ACE).

Anexo D: Ajuste del incremento de vida en servicio de los tratamientos

D.1. Valores propuestos en estudios internacionales

A continuación se recogen los valores de incremento de vida en servicio (ΔSL) recogido en distintos estudios internacionales. Los valores resumen mostrados en las filas sombreadas corresponden con los valores promedio.

Tabla Anexo 3: Incremento de vida útil de tratamientos aplicados en pavimentos de asfalto. Valores de estudios internacionales

Tratamiento	Fuente	Mínimo	Máximo
Riego de neblina		3	5
	Hicks (2000)	2	4
	Peshkin et al. (2004)	3	5
	Wu et al. (2010)	4	5
Lechada asfáltica		3	6
	Hicks (2000)	3	7
	Chan et al (2011)	3	5
	TAC (2013)	3	5
	Wu et al. (2010)	4	7
	Peshkin et al. (2004)	3	5
Sello de agregados		4	7
	Hicks (2000)	3	7
	Peshkin et al. (2004)	4	7
	Kraemer et al. (2004)	5	6
	Gransberg et al. (2005)	5	9
	TAC (2013)	3	5
	Wu (2010)	3	8
	Cole y Wood (2014)	5	7
	Chan et al (2011)	4	6
Microaglomerado en frío		4	8
	Labi et al. (2007)	7	15
	Hicks (2000)	3	9
	TAC (2013)	3	7
	Chan et al. (2011)	7	9
	Gransberg (2010) - Tipo III	3	5
	Gransberg (2010) - Tipo II	2	4
	Wu (2010)	3	8

Tratamiento	Fuente	Mínimo	Máximo
Recrecido funcional		5	12
	TAC (2013)	8	12
	Hicks (2000)	2	12
Recrecido estructural con asfalto		8	15
	TAC (2013)	8	15
Reciclado en caliente		8	14
	TAC (2013)	6	15
	Chan et al (2011)	10	12
Reciclado en frío		12	15
	TAC (2013)	12	15

Tabla Anexo 4: Incremento de vida útil de tratamientos aplicados en pavimentos de hormigón. Valores de estudios internacionales

Tratamiento	Fuente	Mínimo	Máximo
Cepillado		7	14
	Correa y Wong (2001)	8	10
	Wu et al. (2010)	4	17
	TAC (2013)	8	15
Reparación losa		5	15
	TAC (2013)	5	15
Recrecido funcional con asfalto		10	15
	TAC (2013)	10	15
Recrecido estructural con asfalto		10	15
	TAC (2013)	10	15
Recrecido estructural con hormigón		15	31
	TAC (2013)	15	30
	Wu et al. (2010)	15	31

D.2. Valores estimados a partir de estudio de FHWA

A continuación se recogen los valores estimados de incremento de vida en servicio (ΔSL) calculados a partir de los incrementos de condición recogidos en el estudio de la FHWA (Wu et al. 2010). Tanto para los pavimentos de la red estructurante como secundaria, se ha estimado el incremento de vida en servicio obtenido al aplicar el tratamiento en el valor mínimo de condición en el que este puede aplicarse.

Tabla Anexo 5: Incremento de vida útil de tratamientos aplicados en pavimentos de asfalto.
Valores estimados a partir del estudio de la FHWA (Wu et al. 2010)

Tratamiento	IC	ICbef	ICaft	Mejora	Promedio	Red estructurante		Red secundaria	
						ICPU _{bef}	ΔSL	ICPU _{bef}	ΔSL
Riego de neblina					5%	8,50	0,41	-	-
	PSC	96	99	3%					
	PSC	98	99	1%					
	PSC	99	99	0%					
	CS	91,1	94,2	3%					
	CS	70,9	88	17%					
Lechada asfáltica					23%	7,50	1,89	-	-
	IRI	111	81	19%					
	IRI	116	73	27%					
Sello de agregados					24%	7,50	1,98	-	-
	PQI	3,6	3,1	11%					
	CS	60	97,95	38%					
	PSC	73	88	15%					
	PSC	75	98	23%					
	PSC	64	96	32%					
	DI	19,3	1,1	36%					
	DI	7,3	0,7	13%					
Microaglomerado en frío					10%	7,00	0,68	-	-
	PQI	3,4	3,8	9%					
	CS	84,6	94,8	10%					
	DI	7,5	1,7	12%					
Recrecido funcional asfalto					31%	6,50	2,20	6,00	2,12
	IRI	97	36	39%					
	IRI	95	71	15%					
	PQI	2,7	4,1	31%					
	PQI	2,4	3,9	33%					
	PQI	3	3,9	20%					
	PSC	63	99	36%					
	PSC	69	99	30%					
	PSC	60	99	39%					
	PSC	61	99	38%					
Reciclado en caliente					23%	5,50	2,26	-	-
	IRI	94	44	32%					
	IRI	73	53	13%					
	IRI	67	55	8%					
	CS	58,8	37,5	22%					

Tratamiento	IC	IC _{bef}	IC _{aft}	Mejora	Promedio	Red estructurante		Red secundaria	
						ICPU _{bef}	ΔSL	ICPU _{bef}	ΔSL
	PSC	57	98	41%					
Reciclado en frío					46%	5,50	3,46	-	-
	IRI	128	49	50%					
	IRI	118	61	36%					
	IRI	111	78	21%					
	PQI	2,8	4	27%					
	PQI	2,4	4	36%					
	PQI	2,4	4	36%					
	DI	46,7	0	93%					
	DI	29	0,3	57%					
	PSC	68	99	31%					
	PSC	42	99	57%					
	PSC	32	99	67%					
Recrecido estructural asfalto					33%	4,50	3,18	3,50	2,11
	DI	20,9	5,4	31%					
	PQI	3	4,1	24%					
	PQI	2,5	3,9	31%					
	PQI	2,3	3,9	36%					
	PSC	57	100	43%					
	PSC	51	99	48%					
	PSC	80	99	19%					

Donde, IC es Índice de Condición; IC_{bef} es la condición previa a aplicar el tratamiento; IC_{aft} es la condición tras la aplicación del tratamiento

Tabla Anexo 6: Incremento de vida útil de tratamientos aplicados en pavimentos de hormigón. Valores estimados a partir del estudio de la FHWA (Wu et al. 2010)

Tratamiento	IC	IC _{bef}	IC _{aft}	Mejora	Promedio	Red estructurante		Red secundaria	
						ICPU _{bef}	ΔSL	ICPU _{bef}	ΔSL
Cepillado					16%	60%	32%	-	-
	IRI	146	68	49%					
	IRI	168	73	60%					
	PQI	2,5	3,2	16%					
	PQI	2,6	3,5	20%					
	PQI	2,8	3,5	16%					
Reparación losa					1%	13%	6%	4,50	1,02
	DI	12,6	8,9	7%					
	DI	10,3	6,6	7%					
	DI	6,7	3,6	6%					
	PQI	3	3,6	13%					
	PQI	3,2	3,4	4%					
	PQI	3,7	3,8	2%					
	IRI	122	129	4%					
	IRI	110	102	5%					
	IRI	100	99	1%					
Recrecido estructural asfáltico					13%	55%	32%	4,50	3,16
	IRI	99	79	13%					
	IRI	104	59	28%					
	IRI	99	52	30%					
	PQI	2,6	4	31%					
	PQI	2,3	3,9	36%					
	PQI	2,1	4,1	44%					
	PSC	75	100	25%					
	PSC	44	99	55%					
	DI	11,5	0	23%					
Recrecido estructural hormigón					24%	151%	66%	4,50	5,63
	DI	71,8	0	144%					
	DI	32,7	3	59%					
	DI	32,1	0,4	63%					
	DI	75,3	0	151%					
	PQI	2,8	3,9	24%					
	PQI	2,8	4,1	29%					
	PQI	2,8	4	27%					

Donde, IC es Índice de Condición; IC_{bef} es la condición previa a aplicar el tratamiento; IC_{aft} es la condición tras la aplicación del tratamiento

Anexo E: Impacto ambiental de la aplicación de tareas de conservación

En este anexo se recoge un detalle de otras emisiones e impactos ambientales que podrían ser considerados en la evaluación, los cuales han sido estimados a través de la herramienta PaLATE.

Tabla Anexo 7: Emisiones y otros impactos ambientales evaluados en PaLATE para tratamientos en pavimentos asfálticos

Tratamiento	Energía [MJ/m ²]	Consumo de agua [g/m ²]	CO ₂ [kg/m ²]	NO _x [g/m ²]	PM ₁₀ [g/m ²]	SO ₂ [kg/m ²]	CO [g/m ²]	Hg [mg/m ²]	Pb [mg/m ²]	Residuos Generados [kg]	Potencial de Toxicidad Humana (Cancerígeno)	Potencial de Toxicidad Humana (No cancerígeno)
Riego neblina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lechada asfáltica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Microaglomerado en frío	34,03	12,15	1,96	20,51	8,94	0,38	7,61	0,04	2,17	0,35	5,91	6.918
Sello de agregado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Recrecido funcional	80,48	21,83	4,13	36,61	22,02	1,14	13,25	0,08	4,18	0,84	14,63	21.940
Recrecido estructural	198,53	53,26	10,33	110,50	57,19	2,74	33,64	0,20	10,20	2,05	34,15	51.454
Reciclado in situ en caliente	111,95	27,79	5,73	81,46	33,25	1,37	19,49	0,10	5,29	1,06	17,18	25.857
Reciclado in situ en frío	129,96	37,64	7,14	89,08	34,51	1,41	24,87	0,14	7,16	1,47	17,18	25.860
Reconstrucción	478,21	145,05	26,86	291,14	181,15	5,21	78,60	0,39	21,22	4,03	71,13	147.329

NOTA: (-) Tratamientos no evaluados en PaLATE.

Tabla Anexo 8: Emisiones y otros impactos ambientales evaluados en PaLATE para tratamientos en pavimentos de hormigón

Tratamiento	Energía [MJ/m ²]	Consumo de agua [g/m ²]	CO ₂ [kg/m ²]	NO _x [g/m ²]	PM ₁₀ [g/m ²]	SO ₂ [kg/m ²]	CO [g/m ²]	Hg [mg/m ²]	Pb [mg/m ²]	Residuos Generados [kg]	Potencial de Toxicidad Humana (Cancerígeno)	Potencial de Toxicidad Humana (No cancerígeno)
Cepillado	0,11	0,01	0,01	0,20	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80
Reparación de losa	297,67	161,96	24,05	318,23	121,62	3,75	118,71	0,34	25,80	0,34	6,51	71.714
Recrecido funcional	80,48	21,83	4,13	36,61	22,02	1,14	13,25	0,08	4,18	0,84	14,63	21.940
Recrecido estructural con asfalto	140,76	33,82	8,26	218,25	60,16	1,38	30,63	0,13	6,46	1,32	17,93	26.773
Recrecido estructural con hormigón	132,53	110,15	18,28	244,24	92,00	0,20	116,56	0,36	22,87	0,35	4,32	37.141
Reconstrucción	319,49	229,05	40,63	699,53	224,46	0,41	251,42	0,75	47,47	1,07	8,33	73.909

NOTA: (-) Tratamientos no evaluados en PaLATE.

Anexo F: Código para designar tratamientos en programas de conservación

Tabla Anexo 9: Codificación de tratamientos en asfaltos red estructurante

Código	Tratamiento
1	No hacer nada
2	Riego de neblina
3	Lechada asfáltica
4	Sello de agregado
5	Microaglomerado en frío
6	Recrecido delgado con asfalto
7	Reciclado in-situ en caliente
8	Reciclado in-situ en frío
9	Recrecido estructural con asfalto
10	Reconstrucción

Tabla Anexo 10: Codificación de tratamientos en asfaltos red secundaria

Código	Tratamiento
1	No hacer nada
2	Recrecido delgado con asfalto
3	Recrecido estructural con asfalto
4	Reconstrucción

Tabla Anexo 11: Codificación de tratamientos en hormigones red estructurante

Código	Tratamiento
101	No hacer nada
102	Cepillado
103	Recrecido delgado con asfalto
104	Reparación de losa profundidad total
105	Recrecido estructural con hormigón
106	Recrecido estructural con asfalto
107	Reconstrucción

Tabla Anexo 12: Codificación de tratamientos en hormigones red secundaria

Código	Tratamiento
101	No hacer nada
102	Reparación de losa profundidad total
103	Recrecido estructural con hormigón
104	Recrecido estructural con asfalto
105	Reconstrucción

Anexo G: Escenario presupuestario base para la conservación de la red de estudio

En este anexo se presenta el escenario presupuestario base considerado en el caso de estudio, el cual simula la práctica actual de mantenimiento de la red urbana en Chile. En la actualidad, se detecta que los pavimentos se tratan cuando presentan altos niveles de deterioro, momento en el cual se aplican recrecidos estructurales de asfalto. En base a estas consideraciones, se ha simulado el programa de conservación que se implementaría en el periodo de análisis de 25 años bajo la política observada actualmente. En esta simulación se ha considerado que, cuando los pavimentos son tratados cuando alcanzan el valor mínimo aceptable ($ICPU_{min}$).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se ha simulado el programa de conservación que se implementaría en el periodo de análisis de 25 años (Tabla Anexo 13). Bajo este programa de conservación, y a partir de los módulos de evaluación técnica, económica y ambiental desarrollados en este trabajo, se obtienen los indicadores de la política reactiva actual.

En términos técnicos, la política actual de conservación presenta una efectividad de 1.045 unidades. En términos de condición, el ICPU medio de la red en el periodo de análisis es de 6,43, con una distribución anual que oscila entre 7,9 y 5,6 ICPU (Figura Anexo 4).

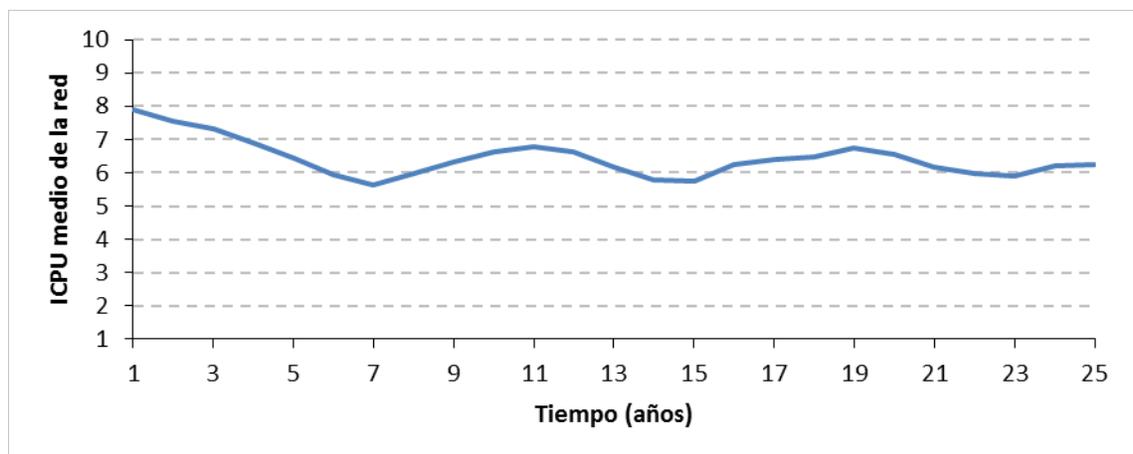


Figura Anexo 4: Condición media anual de la red bajo política reactiva

En términos económicos, la política reactiva tiene un coste actualizado total de 2.855.720 US\$, cuyo flujo anual viene recogido en la Figura Anexo 5.

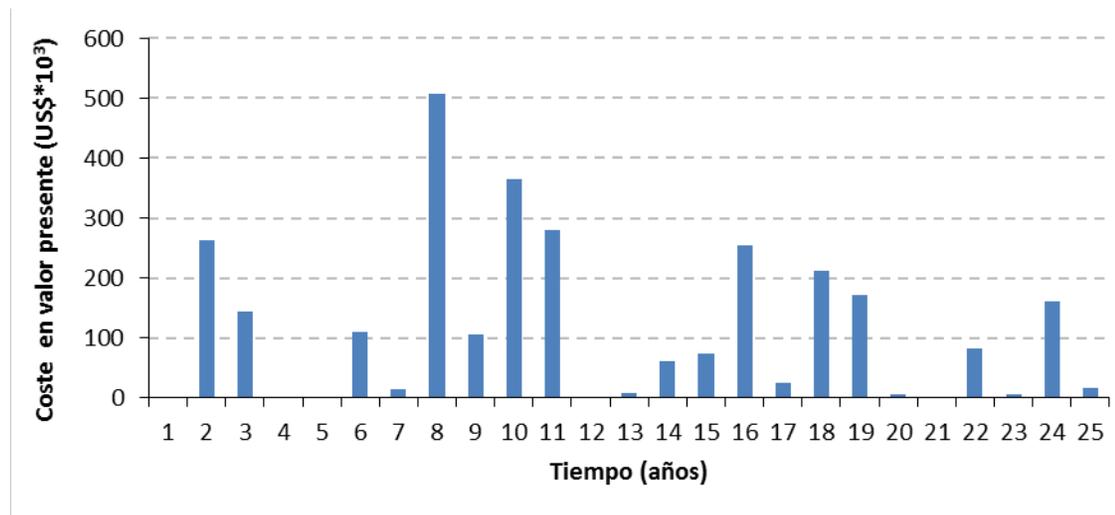


Figura Anexo 5: Flujo de costes anuales actualizados de la política reactiva

En términos ambientales, se estima que la política reactiva actual generará un total de 823.638 kg de CO₂, cuyo flujo anual se muestra en la Figura Anexo 6.

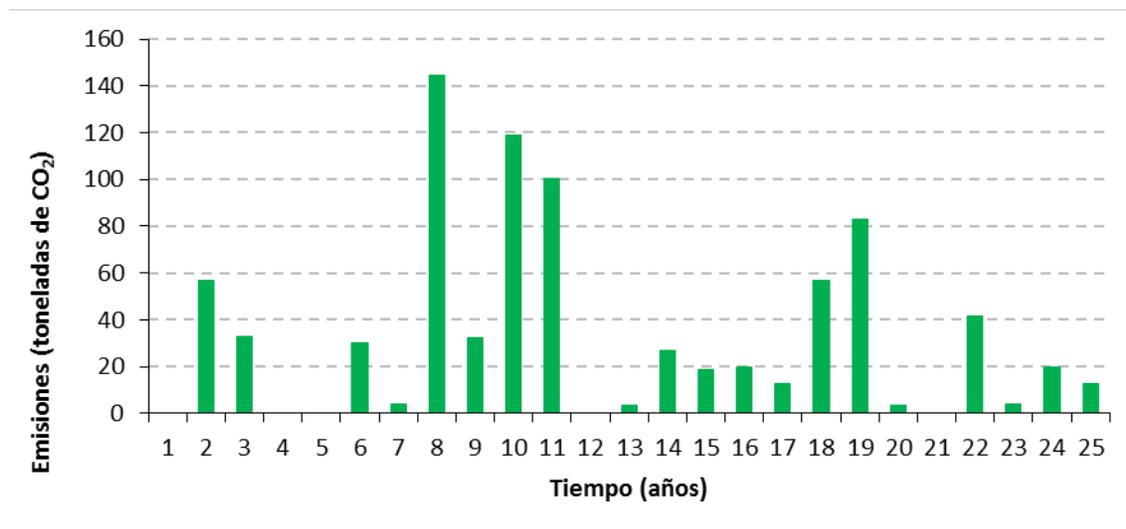


Figura Anexo 6: Flujo de emisiones de CO₂ emitidas con la política reactiva

Tabla Anexo 13: Programa de conservación bajo política reactiva

		Año de análisis																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Tramo	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	2	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	3	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	
	4	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	
	5	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	
	6	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	
	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	
	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	10
	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	11	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1
	12	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1
	13	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
	14	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	10
	15	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1
	16	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
	17	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	10
	18	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
	19	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	10
	20	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	107	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

Anexo H: Resultados de la calibración de heurísticas

H.1. Heurística GFB

Tabla Anexo 14: Resultados de calibración GFB con movimiento H

Tipo de movimiento	$N_{itersm,max}$						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
H250	N_{iter}	1.538	11.148	40.870	51.221	-	-
	ABC_{max}	-63.954	-55.101	-44.530	-36.803	-	-
	Pen	68.600	59.564	49.012	41.292	-	-
	Emi	2.655.730	2.509.190	2.390.460	2.046.320	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-71.956	-68.285	-64.405	-53.026	-	-
	σ_{ABCmax}	11.500	12.415	12.200	15.653	-	-
H100	N_{iter}	5.543	23.373	41.392	56.859	-	-
	ABC_{max}	-49.725	-36.225	-28.405	-23.332	-	-
	Pen	54.237	40.701	32.882	27.841	-	-
	Emi	2.101.710	1.736.720	1.665.640	1.625.540	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-80.149	-70.936	-59.310	-51.758	-	-
	σ_{ABCmax}	35.466	35.282	37.234	36.331	-	-
H50	N_{iter}	5.008	18.447	28.707	68.120	172.145	-
	ABC_{max}	-48.607	-22.910	-20.227	-10.045	-9.944	-
	Pen	53.141	27.365	24.703	14.559	14.500	-
	Emi	1.745.400	1.553.080	1.492.410	1.453.610	1.458.070	-
	\overline{ABC}_{max}	-72.360	-54.720	-47.050	-43.937	-41.293	-
	σ_{ABCmax}	31.749	34.208	36.013	36.789	37.525	-
H25	N_{iter}	8.525	14.738	38.626	57.864	130.627	135.627
	ABC_{max}	-37.257	-20.467	-12.834	-12.799	-12.764	-12.764
	Pen	41.729	24.921	17.317	17.323	17.316	17.316
	Emi	2.442.680	1.505.900	1.480.670	1.492.670	1.502.430	1.502.430
	\overline{ABC}_{max}	-68.832	-53.499	-47.004	-45.673	-44.745	-44.740
	σ_{ABCmax}	27.205	25.866	27.246	26.266	26.443	26.440
H5	N_{iter}	10.056	16.097	16.347	25.052	54.107	74.371
	ABC_{max}	-12.518	-12.479	-12.479	-12.467	-12.459	-12.454
	Pen	17.049	17.041	17.041	17.038	17.035	17.035
	Emi	1.391.070	1.383.810	1.383.810	1.396.390	1.375.030	1.375.200
	\overline{ABC}_{max}	-57.971	-52.852	-52.323	-52.313	-52.306	-52.302
	σ_{ABCmax}	40.630	41.569	41.534	41.533	41.533	41.534

Donde, - corresponde con ejecuciones inviables que necesitaron más de 100 horas de cálculo

Tabla Anexo 15: Resultados de calibración GFB con movimiento F

Tipo de movimiento	$N_{itersm,max}$						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
F250	N_{iter}	386	536	786	3.667	23.822	130.533
	ABC_{max}	-65.507	-65.507	-65.507	-62.783	-58.715	-57.218
	Pen	70.140	70.140	70.140	67.426	63.283	61.762
	Emi	3.059.540	3.059.540	3.059.540	3.022.860	2.512.500	2.871.720
	\overline{ABC}_{max}	-81.354	-81.240	-80.956	-80.706	-78.961	-71.542
	σ_{ABCmax}	31.443	31.463	31.415	31.493	31.651	18.867
	F100	N_{iter}	394	2.268	3.207	7.537	27.124
ABC_{max}		-64.524	-62.316	-62.208	-60.811	-55.813	-55.813
Pen		69.173	66.939	66.812	65.392	60.357	60.357
Emi		2.817.580	3.554.500	3.142.650	2.681.780	2.690.680	2.690.680
\overline{ABC}_{max}		-90.188	-89.056	-85.751	-85.342	-79.024	-79.024
σ_{ABCmax}		37.154	37.653	34.000	34.167	34.587	34.587
F50		N_{iter}	1.017	3.197	7.090	16.070	85.992
	ABC_{max}	-61.298	-60.377	-55.460	-49.909	-44.694	-42.206
	Pen	65.828	64.947	59.976	54.404	49.159	46.700
	Emi	2.627.680	2.421.760	2.820.350	2.586.820	2.470.080	2.526.730
	\overline{ABC}_{max}	-83.512	-80.469	-79.103	-76.937	-69.767	-67.542
	σ_{ABCmax}	32.733	32.774	33.156	33.733	31.703	32.521
	F25	N_{iter}	3.453	4.614	6.891	23.527	48.663
ABC_{max}		-49.346	-49.213	-48.386	-37.906	-27.960	-
Pen		53.841	53.730	52.861	42.344	32.412	-
Emi		2.059.180	2.075.030	1.559.780	1.411.490	1.464.520	-
\overline{ABC}_{max}		-81.857	-76.075	-72.366	-68.314	-58.417	-
σ_{ABCmax}		35.307	35.411	35.336	36.814	37.163	-
F5		N_{iter}	6.244	12.191	18.721	36.729	-
	ABC_{max}	-25.333	-17.667	-12.597	-12.575	-	-
	Pen	29.823	22.195	17.143	17.139	-	-
	Emi	1.447.860	1.410.310	1.408.100	1.419.230	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-62.958	-53.238	-51.578	-49.018	-	-
	σ_{ABCmax}	27.463	28.808	29.625	30.629	-	-

Donde, - corresponde con ejecuciones inviables que necesitaron más de 100 horas de cálculo

En la Tabla Anexo 16 se muestra el programa de conservación óptimo obtenido con la heurística GFB, que corresponde con un movimiento H25 y 500 iteraciones sin mejora como criterio de parada (solución sombreada en la Tabla Anexo 14).

Tabla Anexo 16: Programa de conservación óptimo con GFB

		Año de análisis																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Tramo	1	5	9	1	5	4	3	1	3	4	3	4	4	1	6	1	1	5	3	5	1	4	4	1	2	4	
	2	9	1	3	5	1	3	1	3	1	5	1	1	3	1	5	4	1	5	4	2	1	2	3	3	1	
	3	1	2	2	1	1	1	3	1	2	3	3	1	3	1	3	3	1	3	2	3	1	3	3	1	1	
	4	1	1	1	9	1	1	5	1	5	1	1	5	3	3	1	3	3	1	4	1	3	3	1	3	3	
	5	1	2	8	1	3	1	3	5	4	4	1	3	3	1	2	4	7	4	3	5	5	1	2	2	4	
	6	3	5	7	3	1	4	6	1	2	3	4	7	2	6	5	10	4	1	1	6	1	4	6	6	1	
	7	3	1	3	2	1	6	3	4	2	1	4	2	5	8	5	1	4	3	1	4	3	5	5	2	1	
	8	3	1	2	1	5	2	1	5	3	1	3	1	5	4	4	2	1	3	5	4	3	5	3	1	8	
	9	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	3	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	
	10	3	1	4	1	2	1	5	5	1	1	4	1	4	3	2	1	5	2	1	5	3	1	5	4	2	
	11	102	107	107	107	105	106	1	1	4	4	4	1	4	1	3	1	3	1	5	4	2	2	4	1	5	
	12	105	105	105	105	106	1	5	3	3	1	3	5	3	5	6	1	2	1	5	1	3	1	5	1	3	
	13	106	5	3	4	1	2	1	5	1	4	5	5	5	1	1	6	2	4	1	5	1	2	3	1	3	
	14	103	103	103	103	104	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	1
	15	106	3	1	3	1	1	5	4	1	4	3	4	1	3	1	2	1	1	5	3	1	5	1	1	3	
	16	103	106	3	3	3	1	1	5	4	1	3	5	1	5	4	1	3	4	1	6	7	2	4	1	4	
	17	105	104	1	1	1	1	3	1	3	1	1	2	2	1	2	3	2	2	3	3	2	3	3	3	1	
	18	105	105	106	1	1	1	5	6	3	1	1	5	3	4	3	3	1	5	3	2	1	7	1	1	3	
	19	105	105	105	105	104	1	3	1	3	1	2	1	3	1	3	1	1	3	1	2	1	1	3	1	1	
	20	102	105	106	3	1	1	5	5	4	7	8	3	5	1	5	3	5	5	2	1	5	4	4	7	4	

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

H.2. Heurística TA

Tabla Anexo 17: Resultados de calibración TA

	$N_{iter\ Umb}$		
	$2 \cdot N_{iter\ GFB}$	$3 \cdot N_{iter\ GFB}$	$4 \cdot N_{iter\ GFB}$
N_{iter}	135.632	196.803	247.715
ABC_{max}	-12.198	-12.155	-12.181
Pen	16.757	16.727	16.749
Emi	1.943.710	2.000.090	1.950.200
\overline{ABC}_{max}	-34.461	-35.538	-34.651
$\sigma_{ABC_{max}}$	16.572	16.569	16.181

La Tabla Anexo 18 muestra el programa de conservación óptimo obtenida con la heurística TA, que corresponde con una búsqueda con $N_{iter\ Umb} = 3 \cdot N_{iter\ GFB}$ (solución sombreada en la Tabla Anexo 17).

Tabla Anexo 18: Programa de conservación óptimo con TA

		Año de análisis																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tramo	1	2	1	9	5	1	3	4	1	3	1	1	5	2	1	6	4	3	4	1	5	1	4	3	1	8
	2	9	1	4	3	2	1	1	5	5	1	3	1	5	5	1	1	5	1	3	1	2	3	1	4	3
	3	2	1	1	2	1	2	3	3	1	2	3	3	3	3	1	2	1	2	3	3	1	3	3	1	1
	4	6	5	1	4	1	4	2	1	6	3	1	4	3	3	1	3	3	1	4	3	1	3	3	3	1
	5	5	1	5	1	3	1	1	3	5	1	3	1	4	1	4	5	1	3	3	1	3	1	1	5	4
	6	3	5	7	4	3	5	5	1	3	7	4	3	3	1	3	3	7	2	9	6	6	1	1	3	3
	7	5	4	3	1	1	3	1	5	3	1	6	7	4	3	4	1	8	1	3	1	3	1	4	4	3
	8	2	1	4	1	1	3	1	3	1	6	4	4	1	4	1	3	5	3	1	5	1	4	4	3	1
	9	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	3	1	1	3	1	2	1	2	2	1	1
	10	1	2	2	1	3	1	6	5	1	2	1	3	1	5	4	1	3	4	1	4	1	1	6	1	1
	11	107	107	107	107	107	106	4	3	1	2	1	3	1	5	3	3	2	1	6	1	1	3	1	3	1
	12	107	107	107	107	106	1	4	3	1	3	3	1	4	3	3	1	3	1	3	1	5	1	2	2	1
	13	106	3	1	2	1	3	1	5	1	3	3	1	3	5	1	3	1	4	1	6	1	1	3	3	5
	14	105	105	105	105	104	1	3	1	2	2	3	3	1	2	1	2	1	3	1	2	2	3	3	1	1
	15	106	3	1	3	1	1	5	4	3	1	1	1	5	3	1	3	1	5	2	1	6	1	1	4	1
	16	107	106	3	3	1	4	3	1	4	3	3	2	1	3	2	7	4	1	4	4	4	1	1	6	3
	17	105	104	1	1	1	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	1
	18	107	107	106	1	1	4	1	4	3	4	4	1	4	1	1	5	5	1	3	1	3	6	5	4	1
	19	105	105	105	105	104	1	1	3	1	1	3	1	3	3	3	1	3	1	3	3	2	3	1	3	1
	20	107	107	106	3	1	2	1	5	1	1	5	2	1	5	1	1	5	3	1	3	1	3	1	6	5

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

H.3. Heurística SA

Tabla Anexo 19: Resultados de calibración SA con $NCM_{sm,max} = 1$

Coef. enfriamiento (r)	L_m						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
0,8	N_{iter}	11.600	23.500	31.000	79.000	190.000	-
	ABC_{max}	-30.219	-22.614	-17.298	-15.567	-14.863	-
	Pen	34.671	27.061	21.822	20.099	19.453	-
	Emi	1.669.710	1.507.590	1.546.130	1.719.820	1.557.580	-
	\overline{ABC}_{max}	-57.341	-41.748	-39.359	-39.172	-37.532	-
	$\sigma_{ABC_{max}}$	23.429	19.699	17.449	18.352	17.668	-
0,9	N_{iter}	8.900	14.000	40.000	55.000	80.000	140.000
	ABC_{max}	-35.558	-23.555	-15.119	-14.703	-15.200	-15.015
	Pen	40.014	28.017	19.640	19.234	19.696	19.521
	Emi	1.546.680	2.061.110	1.516.700	1.472.580	1.572.910	1.521.150
	\overline{ABC}_{max}	-56.353	-45.426	-40.070	-38.429	-39.629	-39.310
	$\sigma_{ABC_{max}}$	16.698	17.509	17.685	16.632	17.850	18.083
0,99	N_{iter}	4.900	7.750	6.500	17.000	50.000	130.000
	ABC_{max}	-45.705	-41.030	-36.152	-25.784	-20.615	-17.606
	Pen	50.171	45.523	40.602	30.239	25.064	22.011
	Emi	1.841.460	1.711.090	1.994.500	1.719.960	1.675.650	1.570.420
	\overline{ABC}_{max}	-75.154	-64.417	-58.342	-54.641	-44.299	-43.096
	$\sigma_{ABC_{max}}$	21.954	15.278	15.498	14.091	17.123	17.065

Donde, - corresponde con ejecuciones inviables que necesitaron más de 100 horas de cálculo

Tabla Anexo 20: Tabla Anexo 3: Resultados de calibración SA con $NCM_{sm,max} = 2$

Coef. enfriamiento (r)	L_m						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
0,8	N_{iter}	14.000	42.250	36.000	93.000	270.000	-
	ABC_{max}	-25.007	-12.871	-17.294	-15.557	-14.859	-
	Pen	29.533	17.410	21.821	20.097	19.454	-
	Emi	1.507.950	1.557.840	1.541.770	1.720.630	1.561.600	-
	\overline{ABC}_{max}	-50.362	-36.257	-38.830	-39.159	-37.206	-
	$\sigma_{ABC_{max}}$	24.236	20.711	17.735	18.352	17.966	-
0,9	N_{iter}	17.500	28.750	42.000	82.000	70.000	-
	ABC_{max}	-23.086	-17.155	-15.116	-14.694	-14.788	-
	Pen	27.543	21.662	19.636	19.226	19.272	-
	Emi	1.742.180	1.427.810	1.520.870	1.473.960	1.571.080	-

Coef. enfriamiento (r)	L_m						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
\overline{ABC}_{max}	-46.991	-40.993	-38.438	-36.353	-37.834	-	
$\sigma_{ABC_{max}}$	18.576	17.574	16.872	16.994	18.259	-	
0,99	N_{iter}	8.800	9.500	19.000	20.000	130.000	200.000
	ABC_{max}	-43.394	-35.515	-25.714	-25.744	-17.693	-15.060
	Pen	47.820	39.951	30.183	30.236	22.145	19.506
	Emi	2.018.050	1.740.110	1.828.940	1.691.490	1.642.030	1.596.020
	\overline{ABC}_{max}	-71.508	-59.183	-51.956	-49.415	-42.774	-41.171
	$\sigma_{ABC_{max}}$	22.957	13.796	16.885	15.404	17.894	16.979

Donde, - corresponde con ejecuciones inviables que necesitaron más de 100 horas de cálculo

Tabla Anexo 21: Resultados de calibración SA con $NCM_{sm,max} = 3$

Coef. enfriamiento (r)	L_m						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
0,8	N_{iter}	14.100	51.250	87.500	102.000	-	-
	ABC_{max}	-25.007	-12.855	-14.776	-15.557	-	-
	Pen	29.533	17.403	19.332	20.097	-	-
	Emi	1.507.950	1.549.310	1.420.460	1.732.160	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-44.686	-35.044	-38.315	-39.152	-	-
	$\sigma_{ABC_{max}}$	19.289	20.597	18.245	18.354	-	-
0,9	N_{iter}	25.300	43.750	47.000	110.000	-	-
	ABC_{max}	-22.131	-17.130	-15.104	-14.689	-	-
	Pen	26.610	21.650	19.630	19.225	-	-
	Emi	1.406.770	1.413.670	1.508.730	1.479.020	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-42.048	-39.657	-38.239	-36.347	-	-
	$\sigma_{ABC_{max}}$	15.219	17.900	16.914	16.995	-	-
0,99	N_{iter}	14.100	17.000	19.500	50.000	135.000	210.000
	ABC_{max}	-33.001	-33.428	-25.714	-18.139	-17.693	-15.060
	Pen	37.435	37.830	30.183	22.595	22.145	19.506
	Emi	1.939.800	2.049.240	1.828.940	1.882.970	1.642.030	1.596.020
	\overline{ABC}_{max}	-68.788	-54.782	-49.938	-46.297	-41.765	-41.154
	$\sigma_{ABC_{max}}$	23.354	15.090	17.571	16.530	18.480	16.983

Donde, - corresponde con ejecuciones inviables que necesitaron más de 100 horas de cálculo

Tabla Anexo 22: Resultados de calibración SA con $NCM_{sm,max} = 4$

Coef. enfriamiento (r)	L_m						
	100	250	500	1.000	5.000	10.000	
0,8	N_{iter}	26.500	51.500	100.500	128.000	-	-
	ABC_{max}	-14.914	-12.855	-14.767	-15.548	-	-
	Pen	19.451	17.403	19.328	20.096	-	-
	Emi	1.537.040	1.549.310	1.420.410	1.712.830	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-42.858	-34.635	-38.108	-38.850	-	-
	$\sigma_{ABC_{max}}$	20.010	20.143	18.213	18.506	-	-
0,9	N_{iter}	36.800	44.000	70.000	118.000	-	-
	ABC_{max}	-17.018	-17.130	-15.083	-14.689	-	-
	Pen	21.557	21.650	19.623	19.225	-	-
	Emi	1.403.250	1.413.670	1.523.090	1.475.100	-	-
	\overline{ABC}_{max}	-41.040	-39.253	-38.126	-36.245	-	-
	$\sigma_{ABC_{max}}$	15.667	18.001	16.999	17.118	-	-
0,99	N_{iter}	14.200	24.500	20.000	51.000	140.000	220.000
	ABC_{max}	-33.001	-25.751	-25.714	-18.139	-17.693	-15.060
	Pen	37.435	30.218	30.183	22.595	22.145	19.506
	Emi	1.939.800	1.988.070	1.828.940	1.882.970	1.642.030	1.596.020
	\overline{ABC}_{max}	-62.288	-53.741	-48.802	-45.075	-41.349	-40.034
	$\sigma_{ABC_{max}}$	24.295	15.907	17.719	15.591	18.482	17.561

Donde, - corresponde con ejecuciones inviables que necesitaron más de 100 horas de cálculo

En la Tabla Anexo 23 se muestra el programa de conservación óptimo obtenido con la heurística SA, el cual ha sido obtenido con una longitud de cadena de Markov (L_m) de 250 iteraciones, un coeficiente de enfriamiento (r) de 0,8 y un criterio de parada de tres cadenas de Markov sin mejora ($NCM_{sm,max}$) (solución sombreada en la Tabla Anexo 21).

Tabla Anexo 23: Programa de conservación óptimo con SA

		Año de análisis																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tramo	1	3	9	3	1	2	1	5	1	3	8	3	5	4	5	1	4	5	2	2	1	6	4	1	3	7
	2	9	1	3	1	5	1	1	5	5	1	3	1	2	1	3	1	5	1	3	1	4	1	2	3	1
	3	1	2	1	1	2	1	3	1	2	2	3	1	3	3	3	3	1	3	3	3	1	2	3	3	1
	4	1	8	3	1	1	5	4	3	2	1	1	5	5	5	3	1	5	1	4	4	1	5	1	2	1
	5	1	1	8	1	2	1	3	1	5	1	3	3	1	4	5	8	3	4	5	5	1	3	1	4	5
	6	5	1	5	2	1	4	9	1	1	3	6	6	6	4	8	6	3	8	3	8	6	6	3	4	3
	7	3	3	1	4	2	1	5	1	4	1	3	3	3	9	4	3	3	1	4	5	1	5	4	3	5
	8	1	4	1	4	1	1	5	1	2	4	2	1	5	1	5	1	4	3	3	1	4	1	3	4	8
	9	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1
	10	1	2	2	1	1	4	3	7	1	4	1	5	2	1	3	5	5	1	4	5	1	3	3	1	5
	11	102	107	107	107	105	106	3	3	1	4	1	4	4	1	4	1	3	1	3	4	1	4	4	5	2
	12	105	105	107	105	106	4	3	1	3	3	1	4	4	1	3	1	4	1	1	5	3	1	2	4	1
	13	106	1	5	1	2	1	5	3	3	1	5	3	3	1	4	1	5	5	1	3	5	5	4	1	2
	14	103	103	103	105	104	1	1	2	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	2	2	1	1	3	1
	15	106	3	1	3	1	2	1	3	2	1	5	1	3	5	3	1	3	3	1	1	5	1	4	5	1
	16	105	106	3	1	1	5	5	1	5	4	1	5	3	5	1	4	3	1	5	4	3	5	3	1	3
	17	105	104	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	2	2	1	2	3	1	3	1	3	3	2	1
	18	103	104	106	3	1	2	5	2	1	5	4	5	1	4	3	5	1	1	5	4	1	5	8	1	1
	19	103	105	105	105	104	1	3	1	3	1	3	3	3	3	1	3	1	2	3	3	3	1	3	3	1
	20	101	107	106	1	3	3	5	1	4	3	6	1	1	5	1	4	3	5	6	3	4	5	2	4	1

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

H.4. GRASP

Tabla Anexo 24: Resultados de calibración GRASP con $\eta = 0$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	100	1.964	7.452	23.299
	ABC_{max}	-195.511	-139.690	-139.527	-136.961
	Pen	199.433	143.949	143.754	141.241
	Emi	1.117.960	1.959.320	1.865.650	1.900.350
	\overline{ABC}_{max}	-195.511	-139.690	-139.527	-136.961
	σ_{ABCmax}	-	-	-	-
	H25	N_{iter}	1.352	3.766	7.303
ABC_{max}		-128.609	-126.043	-126.009	-121.244
Pen		132.777	130.255	130.230	125.497
Emi		1.353.300	1.344.230	1.353.490	1.456.490
\overline{ABC}_{max}		-128.609	-126.043	-126.009	-121.244
σ_{ABCmax}		-	-	-	-
H5		N_{iter}	1.129	2.479	5.496
	ABC_{max}	-118.318	-110.741	-110.712	-105.656
	Pen	122.474	114.928	114.909	109.893
	Emi	1.255.130	1.245.530	1.201.240	1.222.450
	\overline{ABC}_{max}	-118.318	-110.741	-110.712	-105.656
	σ_{ABCmax}	-	-	-	-

NOTA: En el cálculo determinista hay una única solución, por lo que no existe desviación estándar

Tabla Anexo 25: Resultados de calibración GRASP con $\eta = 0,10$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	683	3.494	13.282	44.629
	ABC_{max}	-129.265	-128.744	-121.579	-116.308
	Pen	133.424	132.978	125.852	120.612
	Emi	1.367.870	1.239.910	1.169.470	1.239.270
	\overline{ABC}_{max}	-154.545	-149.021	-146.963	-144.477
	σ_{ABCmax}	31.085	26.794	26.255	28.835

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H25	N_{iter}	881	3.018	7.034	28.264
	ABC_{max}	-123.820	-121.090	-113.408	-110.826
	Pen	127.889	125.270	117.572	115.101
	Emi	1.151.210	1.261.900	1.155.350	1.255.770
	\overline{ABC}_{max}	-145.475	-140.093	-135.830	-133.486
	σ_{ABCmax}	31.924	27.206	27.990	28.173
	H5	N_{iter}	1.927	7.947	11.803
ABC_{max}		-108.266	-103.202	-100.857	-100.619
Pen		112.432	107.377	105.109	104.882
Emi		909.926	1.116.850	933.398	988.247
\overline{ABC}_{max}		-130.744	-124.101	-119.154	-121.186
σ_{ABCmax}		28.384	28.361	27.417	28.270

Tabla Anexo 26: Resultados de calibración GRASP con $\eta = 0,25$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	790	1.830	14.561	43.944
	ABC_{max}	-134.026	-131.493	-124.083	-123.722
	Pen	138.237	135.690	128.336	127.992
	Emi	1.144.800	1.336.430	1.316.200	954.075
	\overline{ABC}_{max}	-160.955	-159.651	-158.985	-154.986
	σ_{ABCmax}	32.512	33.272	34.039	33.069
	H25	N_{iter}	802	9.459	20.897
ABC_{max}		-126.175	-126.042	-118.847	-113.576
Pen		130.358	130.299	123.196	117.867
Emi		874.049	872.405	1.293.060	996.643
\overline{ABC}_{max}		-154.636	-150.124	-144.869	-145.631
σ_{ABCmax}		33.060	34.085	32.840	33.396
H5		N_{iter}	2.651	9.007	14.875
	ABC_{max}	-113.250	-108.154	-100.643	-100.700
	Pen	117.443	112.422	104.905	104.912
	Emi	703.104	681.377	713.456	1.093.580
	\overline{ABC}_{max}	-141.265	-134.753	-132.806	-130.977
	σ_{ABCmax}	32.792	35.767	34.909	35.584

Tabla Anexo 27: Resultados de calibración GRASP con $\eta = 0,50$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	1.801	3.104	16.091	22.138
	ABC_{max}	-131.423	-131.523	-134.284	-123.823
	Pen	135.617	135.790	138.608	128.053
	Emi	1.183.420	1.297.150	1.528.800	1.251.960
	ABC_{max}	-198.016	-197.865	-196.328	-192.181
	σ_{ABCmax}	44.914	46.245	44.035	41.972
	H25	N_{iter}	1.041	6.774	9.964
ABC_{max}		-131.612	-123.669	-118.765	-113.454
Pen		135.790	127.932	123.074	117.712
Emi		1.308.530	1.152.870	1.225.290	1.061.400
ABC_{max}		-187.648	-186.982	-188.225	-182.417
σ_{ABCmax}		40.125	40.141	45.795	40.881
H5		N_{iter}	2.776	8.911	8.307
	ABC_{max}	-116.330	-108.192	-105.881	-105.898
	Pen	120.511	112.464	110.092	110.122
	Emi	1.156.720	1.006.700	865.442	928.724
	ABC_{max}	-178.780	-170.071	-170.465	-170.157
	σ_{ABCmax}	44.618	40.008	45.587	45.171

En la Tabla Anexo 23 se muestra el programa de conservación óptimo obtenido con la heurística GRASP, que corresponde con un parámetro de probabilidad de $\eta = 0,10$; movimiento H5 y 1.000 iteraciones sin mejora como criterio de parada (solución sombreada en la Tabla Anexo 28).

Tabla Anexo 28: Programa de conservación óptimo con GRASP

		Año de análisis																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Tramo	1	9	1	6	1	1	1	3	2	1	2	3	1	6	1	2	3	1	2	3	1	6	1	3	3	1	
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	3	3	1	2	1	2	3	1	2	3	3	2	3	1	
	4	1	9	1	3	1	1	3	1	5	1	1	3	1	2	2	1	6	1	3	1	3	1	3	1	6	
	5	5	1	1	1	1	9	1	1	1	3	3	2	1	6	1	1	3	1	1	6	1	1	3	1	6	
	6	7	3	3	1	3	1	2	5	1	3	3	1	6	1	1	3	1	3	1	1	6	1	6	3	1	
	7	5	1	1	3	1	3	1	3	2	1	3	3	1	3	1	3	3	7	1	1	3	3	1	3	3	
	8	2	1	1	3	1	1	1	8	1	1	3	1	3	1	1	5	1	2	2	1	3	3	1	6	1	
	9	1	1	1	3	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	3	1	2	2	2	1	2	1	2	2	
	10	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3	1	2	2	1	6	1	1	3	3	1	3	1	6	1	1	
	11	101	103	101	102	101	101	102	101	101	106	1	1	1	3	1	3	3	2	1	6	1	3	1	6	1	
	12	101	101	105	101	101	101	101	101	102	101	106	1	1	2	2	1	3	1	6	1	1	3	1	3	6	
	13	101	101	101	101	105	101	101	101	102	101	101	101	103	102	102	102	101	102	102	102	101	102	101	101	101	
	14	101	101	101	101	101	102	101	102	104	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	3	3	1	1	
	15	101	101	101	105	101	101	102	102	101	101	101	103	102	101	102	102	102	101	101	101	102	101	101	101	101	
	16	101	101	101	101	101	105	101	101	102	101	101	102	101	106	1	1	1	3	3	2	1	5	1	3	1	
	17	101	101	101	101	103	102	103	101	101	103	103	101	101	101	103	101	103	104	1	2	3	1	3	1	2	
	18	101	102	101	101	101	101	104	101	101	102	101	101	101	101	101	106	1	3	1	3	1	3	1	3	1	
	19	101	101	101	103	101	101	104	1	3	1	1	3	1	1	3	1	3	3	1	3	1	3	1	3	1	
	20	101	101	101	101	105	101	102	102	101	101	102	101	101	102	101	101	102	101	102	101	101	102	102	101	101	

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

Anexo I: Resultados de la calibración de la heurística híbrida

Tabla Anexo 29: Resultados de calibración heurística híbrida con $\eta = 0,00$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	100	250	500	1.677
	ABC_{max}	3.906	3.906	3.906	3.907
	Pen	0	0	0	0
	Emi	1.101.300	1.101.300	1.101.300	1.101.310
	\overline{ABC}_{max}	3.906	3.906	3.906	3.907
	σ_{ABCmax}	-	-	-	-
	H25	N_{iter}	100	250	500
ABC_{max}		3.906	3.906	3.906	3.906
Pen		0	0	0	0
Emi		1.101.300	1.101.300	1.101.300	1.101.300
\overline{ABC}_{max}		3.906	3.906	3.906	3.906
σ_{ABCmax}		-	-	-	-
H5		N_{iter}	100	250	500
	ABC_{max}	3.906	3.906	3.906	3.906
	Pen	0	0	0	0
	Emi	1.101.300	1.101.300	1.101.300	1.101.300
	\overline{ABC}_{max}	3.906	3.906	3.906	3.906
	σ_{ABCmax}	-	-	-	-

NOTA: En el cálculo determinista hay una única solución, por lo que no existe desviación estándar

Tabla Anexo 30: Resultados de calibración heurística híbrida con $\eta = 0,10$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	100	250	640	1.000
	ABC_{max}	3.895	3.895	3.898	3.895
	Pen	0	0	0	0
	Emi	1.103.850	1.103.850	1.103.860	1.103.850
	\overline{ABC}_{max}	-81.477	-62.832	-36.629	-33.612
	σ_{ABCmax}	58.774	45.773	19.419	19.470
	H25	N_{iter}	100	315	500
ABC_{max}		3.895	3.895	3.895	3.905
Pen		0	0	0	0
Emi		1.103.850	1.103.850	1.103.850	1.103.510
\overline{ABC}_{max}		-67.356	-44.699	-26.295	-24.099
σ_{ABCmax}		47.757	31.623	18.181	16.077

Movimiento	$N_{itersm,max}$			
	100	250	500	1.000
N_{iter}	100	454	1.071	3.651
ABC_{max}	3.895	3.901	3.910	3.912
Pen	0	0	0	0
Emi	1.103.850	1.116.680	1.116.390	1.125.940
\overline{ABC}_{max}	-40.420	-22.561	-20.474	-16.797
σ_{ABCmax}	32.946	23.616	22.512	8.730

Tabla Anexo 31: Resultados de calibración heurística híbrida con $\eta = 0,25$

Movimiento	$N_{itersm,max}$			
	100	250	500	1.000
N_{iter}	693	3.265	16.986	48.443
ABC_{max}	-40.028	-34.834	-40.201	-32.295
Pen	44.208	39.185	44.664	36.720
Emi	1.597.970	1.479.600	1.828.230	1.605.870
\overline{ABC}_{max}	-83.214	-65.432	-56.257	-61.816
σ_{ABCmax}	50.491	35.865	22.767	30.989
N_{iter}	3.699	6.799	19.848	34.267
ABC_{max}	-29.676	-28.878	-29.213	-22.131
Pen	34.043	33.286	33.679	26.623
Emi	1.390.470	1.024.400	1.373.040	1.326.660
\overline{ABC}_{max}	-61.999	-57.599	-50.224	-49.557
σ_{ABCmax}	39.144	36.123	29.487	29.029
N_{iter}	3.814	9.796	11.570	19.727
ABC_{max}	-18.784	-13.461	-15.954	-13.427
Pen	23.043	17.869	20.389	17.753
Emi	949.808	831.923	818.537	953.377
\overline{ABC}_{max}	-60.318	-45.017	-47.561	-49.786
σ_{ABCmax}	42.553	34.674	44.301	42.875

Tabla Anexo 32: Resultados de calibración heurística híbrida con $\eta = 0,50$

Movimiento	$N_{itersm,max}$				
	100	250	500	1.000	
H50	N_{iter}	810	6.441	9.715	33.285
	ABC_{max}	-45.923	-40.456	-37.890	-37.372
	Pen	50.123	44.913	42.294	41.890
	Emi	1.902.800	1.776.530	1.875.430	1.730.510
	\overline{ABC}_{max}	-111.115	-105.859	-101.895	-103.480
	σ_{ABCmax}	57.179	57.007	57.688	58.053
	H25	N_{iter}	2.133	7.333	19.402
ABC_{max}		-37.349	-34.754	-32.868	-29.567
Pen		41.690	39.203	37.396	34.086
Emi		1.489.820	1.378.590	1.807.070	1.400.840
\overline{ABC}_{max}		-105.569	-102.172	-95.790	-97.506
σ_{ABCmax}		62.910	61.591	58.203	60.669
H5		N_{iter}	3.684	8.698	10.324
	ABC_{max}	-23.868	-18.638	-21.152	-18.599
	Pen	28.157	23.067	25.470	23.056
	Emi	1.132.440	946.910	1.108.780	1.007.340
	\overline{ABC}_{max}	-110.347	-96.410	-92.569	-92.723
	σ_{ABCmax}	75.257	75.069	70.448	73.048

En la Tabla Anexo 28 se muestra el programa de conservación óptimo obtenido con la heurística híbrida, que corresponde con un parámetro de probabilidad de $\eta = 0,10$; movimiento H5 y 1.000 iteraciones sin mejora como criterio de parada y una relajación de la restricción presupuestaria en la fase de construcción del 5%.

Tabla Anexo 33: Programa de conservación óptimo con heurística híbrida

		Año de análisis																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Tramo	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	
	2	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	
	3	2	3	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	3	1	2	1	1	3	1	1	3	1	
	4	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
	5	1	1	1	1	1	9	1	1	2	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	
	6	6	3	1	2	2	2	1	5	1	5	1	2	2	1	3	1	5	3	1	1	6	1	1	1	1	
	7	1	3	1	1	3	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	6	2	1	1	3	1	5	1	1	
	8	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	
	9	1	1	3	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	3	
	10	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	
	11	101	102	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	6	2
	12	101	101	101	106	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	13	101	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	14	101	101	101	101	101	101	104	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1	3	1	2	
	15	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	101	105	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	101	
	16	101	101	101	101	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	106	1	1	2	
	17	101	101	101	101	101	103	101	101	101	101	103	101	101	101	101	103	101	101	101	101	103	101	101	101	103	
	18	101	101	101	102	101	101	101	101	101	101	106	1	1	2	1	1	3	2	1	5	1	1	3	1	1	1
	19	101	101	103	101	101	101	101	101	101	103	101	101	101	102	101	101	101	103	101	101	103	101	101	101	103	101
	20	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	3	1	1	1	3	1	5	1	1	1	1	9	1	1	1	

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo H

Anexo J: Datos de inventario y resultados de validación del algoritmo híbrido

J.1. Datos de inventario de los escenarios analizados

De acuerdo al diseño experimental previsto para validar el algoritmo de optimización heurístico (Figura 5-7) se recogen, a continuación, los datos de inventario considerados en los distintos escenarios analizados. Es importante señalar que, en las tablas presentadas a continuación, se muestran con sombreado gris y letra negrita, los datos de inventario que varían respecto a los considerados en el caso de estudio (que fueron definidos en la sección 4.2.1 y se corresponden con el escenario 50% Asfalto de la Tabla Anexo 34). Las dimensiones de los tramos (longitud y anchura) no varían respecto a las consideradas inicialmente en el caso de estudio (Tabla 4-1).

Tabla Anexo 34: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente estructurante (E) y condición buena

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	E	A	5,5	E	A	5,5	E	A	5,5	E	A	5,5	E	H	5,5
2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	H	5,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	E	A	6,6	E	A	6,6	E	A	6,6	E	A	6,6	E	H	6,6
5	E	A	8,0	E	A	8,0	E	A	8,0	E	A	8,0	E	H	8,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	E	A	8,3	E	A	8,3	E	A	8,3	E	H	8,3	E	H	8,3
8	E	A	9,4	E	A	9,4	E	A	9,4	E	H	9,4	E	H	9,4
9	S	A	10,0	S	A	10,0	S	A	10,0	S	H	10,0	S	H	10,0
10	E	A	9,9	E	A	9,9	E	A	9,9	E	H	9,9	E	H	9,9
11	E	A	7,7	E	A	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7
12	E	A	7,7	E	A	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7
13	E	A	9,0	E	A	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0
14	S	A	8,2	S	A	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2
15	E	A	8,1	E	A	8,1	E	H	8,1	E	H	8,1	E	H	8,1
16	E	A	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5
17	S	A	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3
18	E	A	9,1	E	H	9,1	E	H	9,1	E	H	9,1	E	H	9,1
19	S	A	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3
20	E	A	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2

Tabla Anexo 35: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente estructurante (E) y condición regular

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	E	A	5,5	E	A	5,5	E	A	5,5	E	A	5,5	E	H	5,5
2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	H	5,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	E	A	6,6	E	A	6,6	E	A	6,6	E	A	6,6	E	H	6,6
5	E	A	8,0	E	A	8,0	E	A	8,0	E	A	8,0	E	H	8,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	E	A	8,3	E	A	8,3	E	A	8,3	E	H	8,3	E	H	8,3
8	E	A	5,4	E	A	5,4	E	A	5,4	E	H	5,4	E	H	5,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	6,9	E	A	6,9	E	A	6,9	E	H	6,9	E	H	6,9
11	E	A	7,7	E	A	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7
12	E	A	5,7	E	A	5,7	E	H	5,7	E	H	5,7	E	H	5,7
13	E	A	9,0	E	A	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0
14	S	A	4,2	S	A	4,2	S	H	4,2	S	H	4,2	S	H	4,2
15	E	A	5,1	E	A	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1
16	E	A	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5
17	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
18	E	A	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1
19	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
20	E	A	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2

Tabla Anexo 36: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente estructurante (E) y condición mala

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	E	A	3,5	E	A	3,5	E	A	3,5	E	A	3,5	E	H	3,5
2	E	A	4,2	E	A	4,2	E	A	4,2	E	A	4,2	E	H	4,2
3	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
4	E	A	4,6	E	A	4,6	E	A	4,6	E	A	4,6	E	H	4,6
5	E	A	3,0	E	A	3,0	E	A	3,0	E	A	3,0	E	H	3,0
6	E	A	3,1	E	A	3,1	E	A	3,1	E	H	3,1	E	H	3,1
7	E	A	4,3	E	A	4,3	E	A	4,3	E	H	4,3	E	H	4,3
8	E	A	5,4	E	A	5,4	E	A	5,4	E	H	5,4	E	H	5,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	4,9	E	A	4,9	E	A	4,9	E	H	4,9	E	H	4,9
11	E	A	4,7	E	A	4,7	E	H	4,7	E	H	4,7	E	H	4,7
12	E	A	4,7	E	A	4,7	E	H	4,7	E	H	4,7	E	H	4,7
13	E	A	5,0	E	A	5,0	E	H	5,0	E	H	5,0	E	H	5,0
14	S	A	3,2	S	A	3,2	S	H	3,2	S	H	3,2	S	H	3,2
15	E	A	4,1	E	A	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1
16	E	A	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5
17	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
18	E	A	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1
19	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
20	E	A	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2

Tabla Anexo 37: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente estructurante (E) y condición uniforme

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	E	A	5,5	E	A	5,5	E	A	5,5	E	A	5,5	E	H	5,5
2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	A	5,2	E	H	5,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	E	A	6,6	E	A	6,6	E	A	6,6	E	A	6,6	E	H	6,6
5	E	A	3,0	E	A	3,0	E	A	3,0	E	A	3,0	E	H	3,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	E	A	4,3	E	A	4,3	E	A	4,3	E	H	4,3	E	H	4,3
8	E	A	4,4	E	A	4,4	E	A	4,4	E	H	4,4	E	H	4,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	9,9	E	A	9,9	E	A	9,9	E	H	9,9	E	H	9,9
11	E	A	7,7	E	A	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7
12	E	A	7,7	E	A	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7	E	H	7,7
13	E	A	9,0	E	A	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0
14	S	A	8,2	S	A	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2
15	E	A	4,1	E	A	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1
16	E	A	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5
17	S	A	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3
18	E	A	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1
19	S	A	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3
20	E	A	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2

Tabla Anexo 38: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente secundaria (S) y condición buena

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	5,5	S	A	5,5	S	A	5,5	S	A	5,5	S	H	5,5
2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	H	5,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
5	S	A	8,0	S	A	8,0	S	A	8,0	S	A	8,0	S	H	8,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	S	A	8,3	S	A	8,3	S	A	8,3	S	H	8,3	S	H	8,3
8	E	A	9,4	E	A	9,4	E	A	9,4	E	H	9,4	E	H	9,4
9	S	A	10,0	S	A	10,0	S	A	10,0	S	H	10,0	S	H	10,0
10	E	A	9,9	E	A	9,9	E	A	9,9	E	H	9,9	E	H	9,9
11	S	A	7,7	S	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
12	S	A	7,7	S	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
13	S	A	9,0	S	A	9,0	S	H	9,0	S	H	9,0	S	H	9,0
14	S	A	8,2	S	A	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2
15	E	A	8,1	E	A	8,1	E	H	8,1	E	H	8,1	E	H	8,1
16	S	A	9,5	S	H	9,5	S	H	9,5	S	H	9,5	S	H	9,5
17	S	A	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3
18	S	A	9,1	S	H	9,1	S	H	9,1	S	H	9,1	S	H	9,1
19	S	A	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3
20	E	A	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2

Tabla Anexo 39: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente secundaria (S) y condición regular

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	4,5	S	A	4,5	S	A	4,5	S	A	4,5	S	H	4,5
2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	H	5,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
5	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	S	A	4,3	S	A	4,3	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
8	E	A	5,4	E	A	5,4	E	A	5,4	E	H	5,4	E	H	5,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	6,9	E	A	6,9	E	A	6,9	E	H	6,9	E	H	6,9
11	S	A	3,7	S	A	3,7	S	H	3,7	S	H	3,7	S	H	3,7
12	S	A	5,7	S	A	5,7	S	H	5,7	S	H	5,7	S	H	5,7
13	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
14	S	A	4,2	S	A	4,2	S	H	4,2	S	H	4,2	S	H	4,2
15	E	A	5,1	E	A	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1
16	S	A	4,5	S	H	4,5	S	H	4,5	S	H	4,5	S	H	4,5
17	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
18	S	A	3,1	S	H	3,1	S	H	3,1	S	H	3,1	S	H	3,1
19	S	A	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3
20	E	A	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2

Tabla Anexo 40: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente secundaria (S) y condición mala

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	3,5	S	A	3,5	S	A	3,5	S	A	3,5	S	H	3,5
2	S	A	2,2	S	A	2,2	S	A	2,2	S	A	2,2	S	H	2,2
3	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
4	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
5	S	A	3,0	S	A	3,0	S	A	3,0	S	A	3,0	S	H	3,0
6	E	A	3,1	E	A	3,1	E	A	3,1	E	H	3,1	E	H	3,1
7	S	A	7,3	S	A	7,3	S	A	7,3	S	H	7,3	S	H	7,3
8	E	A	4,4	E	A	4,4	E	A	4,4	E	H	4,4	E	H	4,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	4,9	E	A	4,9	E	A	4,9	E	H	4,9	E	H	4,9
11	S	A	8,7	S	A	8,7	S	H	8,7	S	H	8,7	S	H	8,7
12	S	A	3,7	S	A	3,7	S	H	3,7	S	H	3,7	S	H	3,7
13	S	A	5,0	S	A	5,0	S	H	5,0	S	H	5,0	S	H	5,0
14	S	A	3,2	S	A	3,2	S	H	3,2	S	H	3,2	S	H	3,2
15	E	A	4,1	E	A	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1
16	S	A	5,5	S	A	5,5	S	H	5,5	S	H	5,5	S	H	5,5
17	S	A	4,3	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
18	S	A	6,1	S	A	6,1	S	H	6,1	S	H	6,1	S	H	6,1
19	S	A	7,3	S	A	7,3	S	H	7,3	S	H	7,3	S	H	7,3
20	E	A	5,2	E	A	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2

Tabla Anexo 41: Inventario en escenarios de validación con jerarquía mayoritariamente secundaria (S) y condición uniforme

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	4,5	S	A	4,5	S	A	4,5	S	A	4,5	S	H	4,5
2	S	A	4,2	S	A	4,2	S	A	4,2	S	A	4,2	S	H	4,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
5	S	A	3,0	S	A	3,0	S	A	3,0	S	A	3,0	S	H	3,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	S	A	4,3	S	A	4,3	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
8	E	A	4,4	E	A	4,4	E	A	4,4	E	H	4,4	E	H	4,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	9,9	E	A	9,9	E	A	9,9	E	H	9,9	E	H	9,9
11	S	A	4,7	S	A	4,7	S	H	4,7	S	H	4,7	S	H	4,7
12	S	A	7,7	S	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
13	S	A	9,0	S	A	9,0	S	H	9,0	S	H	9,0	S	H	9,0
14	S	A	8,2	S	A	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2
15	E	A	4,1	E	A	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1
16	S	A	9,5	S	A	9,5	S	H	9,5	S	H	9,5	S	H	9,5
17	S	A	3,3	S	A	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3
18	S	A	6,1	S	A	6,1	S	H	6,1	S	H	6,1	S	H	6,1
19	S	A	3,3	S	A	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3
20	E	A	3,2	E	A	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2

Tabla Anexo 42: Inventario en escenarios de validación con jerarquía uniforme (E-S) y condición buena

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	5,5	S	A	5,5	S	A	5,5	S	A	5,5	S	H	5,5
2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	A	5,2	S	H	5,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
5	S	A	8,0	S	A	8,0	E	A	8,0	E	A	8,0	E	H	8,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	E	A	8,3	E	A	8,3	E	A	8,3	E	H	8,3	E	H	8,3
8	E	A	9,4	E	A	9,4	E	A	9,4	E	H	9,4	E	H	9,4
9	S	A	10,0	S	A	10,0	S	A	10,0	S	H	10,0	S	H	10,0
10	E	A	9,9	E	A	9,9	E	A	9,9	E	H	9,9	E	H	9,9
11	S	A	7,7	S	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
12	S	A	7,7	S	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
13	E	A	9,0	E	A	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0
14	S	A	8,2	S	A	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2
15	E	A	8,1	E	A	8,1	E	H	8,1	E	H	8,1	E	H	8,1
16	E	A	9,5	S	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5
17	S	A	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3
18	E	A	9,1	E	H	9,1	E	H	9,1	E	H	9,1	E	H	9,1
19	S	A	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3	S	H	9,3
20	E	A	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2	E	H	9,2

Tabla Anexo 43: Inventario en escenarios de validación con jerarquía uniforme (E-S) y condición regular

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	4,5	S	A	4,5	S	A	4,5	S	A	4,5	S	H	4,5
2	S	A	5,2	S	A	3,2	S	A	3,2	S	A	3,2	S	H	3,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
4	S	A	6,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
5	S	A	4,0	S	A	5,0	E	A	5,0	E	A	5,0	E	H	5,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	E	A	4,3	E	A	8,3	E	A	8,3	E	H	8,3	E	H	8,3
8	E	A	5,4	E	A	5,4	E	A	5,4	E	H	5,4	E	H	5,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	6,9	E	A	6,9	E	A	6,9	E	H	6,9	E	H	6,9
11	S	A	3,7	E	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
12	E	A	5,7	E	A	5,7	S	H	5,7	S	H	5,7	S	H	5,7
13	E	A	4,0	E	A	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0
14	S	A	4,2	S	A	4,2	S	H	4,2	S	H	4,2	S	H	4,2
15	E	A	5,1	E	A	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1
16	E	A	4,5	S	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5
17	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
18	E	A	3,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1
19	S	A	3,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
20	E	A	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2

Tabla Anexo 44: Inventario en escenarios de validación con jerarquía uniforme (E-S) y condición mala

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	6,5	S	A	6,5	S	A	6,5	S	A	6,5	S	H	6,5
2	S	A	2,2	S	A	2,2	S	A	2,2	S	A	2,2	S	H	2,2
3	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
4	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
5	S	A	3,0	S	A	3,0	E	A	3,0	E	A	3,0	E	H	3,0
6	E	A	3,1	E	A	3,1	E	A	3,1	E	H	3,1	E	H	3,1
7	E	A	7,3	E	A	7,3	E	A	7,3	E	H	7,3	E	H	7,3
8	E	A	4,4	E	A	4,4	E	A	4,4	E	H	4,4	E	H	4,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	4,9	E	A	4,9	E	A	4,9	E	H	4,9	E	H	4,9
11	S	A	8,7	E	A	8,7	S	H	8,7	S	H	8,7	S	H	8,7
12	E	A	3,7	E	A	3,7	S	H	3,7	S	H	3,7	S	H	3,7
13	E	A	5,0	E	A	5,0	E	H	5,0	E	H	5,0	E	H	5,0
14	S	A	3,2	S	A	3,2	S	H	3,2	S	H	3,2	S	H	3,2
15	E	A	4,1	E	A	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1	E	H	4,1
16	E	A	5,5	S	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5	E	H	5,5
17	S	A	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3	S	H	4,3
18	E	A	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1
19	S	A	7,3	S	H	7,3	S	H	7,3	S	H	7,3	S	H	7,3
20	E	A	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2	E	H	5,2

Tabla Anexo 45: Inventario en escenarios de validación con jerarquía uniforme (E-S) y condición uniforme

ID	100% Asfalto			75% Asfalto			50% Asfalto			25% Asfalto			0% Asfalto		
	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}	Red	Estr.	ICPU _{ini}
1	S	A	4,5	S	A	3,5	S	A	3,5	S	A	3,5	S	H	3,5
2	S	A	4,2	S	A	4,2	S	A	4,2	S	A	4,2	S	H	4,2
3	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	3,6	S	A	3,6	S	H	3,6
4	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	A	6,6	S	H	6,6
5	S	A	3,0	S	A	3,0	E	A	3,0	E	A	3,0	E	H	3,0
6	E	A	7,1	E	A	7,1	E	A	7,1	E	H	7,1	E	H	7,1
7	E	A	4,3	E	A	4,3	E	A	4,3	E	H	4,3	E	H	4,3
8	E	A	4,4	E	A	4,4	E	A	4,4	E	H	4,4	E	H	4,4
9	S	A	4,0	S	A	4,0	S	A	4,0	S	H	4,0	S	H	4,0
10	E	A	9,9	E	A	9,9	E	A	9,9	E	H	9,9	E	H	9,9
11	S	A	4,7	E	A	4,7	S	H	4,7	S	H	4,7	S	H	4,7
12	E	A	7,7	E	A	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7	S	H	7,7
13	E	A	9,0	E	A	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0	E	H	9,0
14	S	A	8,2	S	A	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2	S	H	8,2
15	E	A	4,1	E	A	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1	E	H	5,1
16	E	A	9,5	S	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5	E	H	9,5
17	S	A	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3	S	H	3,3
18	E	A	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1	E	H	6,1
19	S	A	3,3	S	H	4,3	S	H	2,3	S	H	2,3	S	H	2,3
20	E	A	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2	E	H	3,2

J.2. Resultados de validación del algoritmo

En los resultados mostrados a continuación se han marcado en sombreado gris aquellos escenarios en los que la heurística híbrida GRASP-GLS-GFB obtiene una efectividad mayor que la heurística clásica ($\Delta ABC_{max} > 0$). En negrita se han marcado los casos en los que la heurística híbrida ha sido computacionalmente más eficiente ($\Delta N_{iter} < 0$).

Tabla Anexo 46: Resultados de validación para red mayoritariamente estructurante (E)

Condición inicial red	Variables validación	Tipo pavimento				
		100% A	75% A	50% A	25% A	0% A
Buena	ΔABC_{max} (%)	0%	8%	12%	18%	18%
	ΔN_{iter} (%)	27%	-16%	-72%	-62%	-75%
Regular	ΔABC_{max} (%)	62%	30%	18%	21%	18%
	ΔN_{iter} (%)	170%	1%	105%	73%	-13%
Mala	ΔABC_{max} (%)	0%	0%	0%	0%	-8%
	ΔN_{iter} (%)	-1%	88%	-5%	45%	31%
Uniforme	ΔABC (%)	35%	-1%	14%	0%	-2%
	ΔN_{iter} (%)	20%	70%	66%	46%	-5%

FUENTE: Elaboración propia

Tabla Anexo 47: Resultados de validación para red mayoritariamente estructurante (S)

Condición inicial red	Variables validación	Tipo pavimento				
		100% A	75% A	50% A	25% A	0% A
Buena	ΔABC_{max} (%)	-2%	-4%	54%	73%	0%
	ΔN_{iter} (%)	-3%	35%	-30%	66%	-11%
Regular	ΔABC_{max} (%)	-12%	-14%	-15%	-18%	-36%
	ΔN_{iter} (%)	-51%	-22%	22%	37%	53%
Mala	ΔABC_{max} (%)	10%	10%	-13%	-2%	-8%
	ΔN_{iter} (%)	-46%	-46%	-8%	9%	9%
Uniforme	ΔABC (%)	0%	0%	-2%	-5%	0%
	ΔN_{iter} (%)	-68%	-68%	-45%	180%	64%

FUENTE: Elaboración propia

Tabla Anexo 48: Resultados de validación para red mayoritariamente estructurante (E-S)

Condición inicial red	Variables validación	Tipo pavimento				
		100% A	75% A	50% A	25% A	0% A
Buena	ΔABC_{max} (%)	-1%	-1%	0%	77%	67%
	ΔN_{iter} (%)	2%	26%	-91%	87%	106%
Regular	ΔABC_{max} (%)	10%	36%	17%	3%	-11%
	ΔN_{iter} (%)	26%	70%	28%	22%	35%
Mala	ΔABC_{max} (%)	0%	10%	21%	12%	-9%
	ΔN_{iter} (%)	-36%	-31%	-13%	82%	-6%
Uniforme	ΔABC (%)	26%	24%	1%	-1%	0%
	ΔN_{iter} (%)	71%	23%	83%	143%	203%

FUENTE: Elaboración propia

Anexo K: Soluciones óptimas obtenidas en la aplicación multiobjetivo

K.1. Solución óptima de máxima efectividad (ABC_{max})

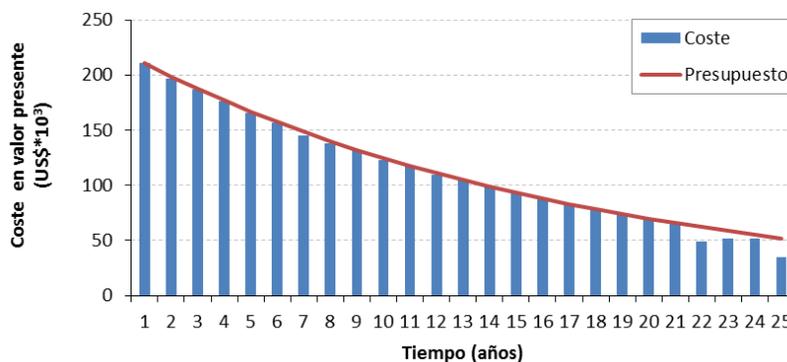


Figura Anexo 7: Flujo de costes de la solución óptima con máxima efectividad

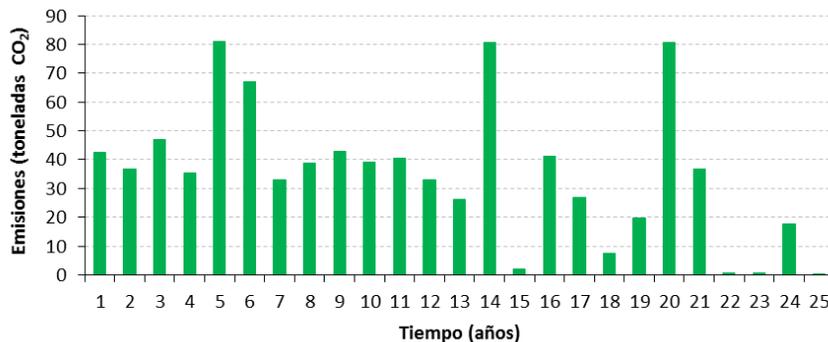


Figura Anexo 8: Flujo de emisiones de la solución óptima con máxima efectividad

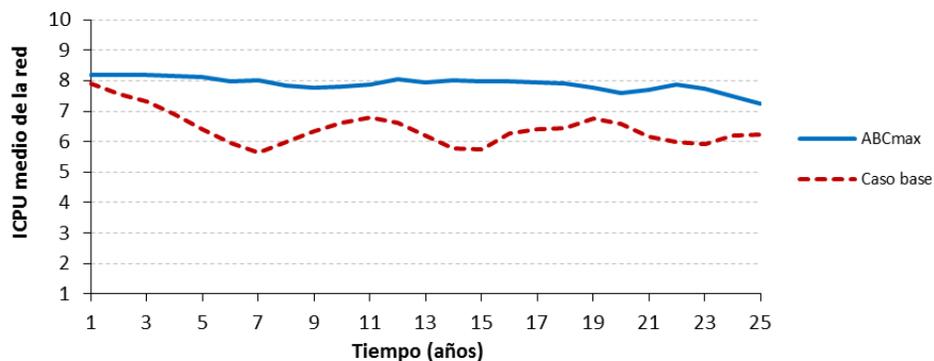


Figura Anexo 9: Condición media de la red con solución de máxima efectividad

Tabla Anexo 49: Programa de conservación de la solución óptima de máxima efectividad

		Año de análisis																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tramo	1	1	9	1	1	2	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	9	1	2	1	1	1	1	1	1	1	9	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1
	4	1	1	9	1	1	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	5	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3	2	1	2
	6	6	3	1	2	3	2	1	5	1	3	1	3	1	3	8	1	1	3	3	3	1	3	1	3	1
	7	3	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	9	1	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
	8	2	1	2	1	1	1	1	1	9	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	2	1
	9	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	2	1	1	1	1
	10	1	1	3	1	1	1	1	1	1	9	1	1	2	1	1	1	1	8	1	1	3	1	3	2	2
	11	101	102	101	101	101	101	101	106	1	1	2	1	3	2	1	1	1	9	1	1	1	3	5	1	3
	12	101	101	101	106	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	13	101	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	1	5	2	1	1	1	1
	14	101	101	101	101	101	101	104	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	3	3	1	3	3
	15	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	105	101	102	102	102	102
	16	101	101	102	101	101	101	101	104	101	101	101	101	104	101	101	101	102	101	101	101	101	102	102	106	1
	17	101	101	101	101	101	103	101	101	101	104	1	1	3	1	3	1	1	2	1	2	2	3	3	3	3
	18	101	101	101	102	101	101	102	101	101	106	1	1	3	3	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1
	19	101	101	103	101	101	101	101	101	104	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	3	3	1
	20	101	101	101	101	101	101	106	1	1	2	2	1	3	1	1	1	1	1	9	1	1	3	3	1	2

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

K.2. Solución óptima recomendada (N_{min})

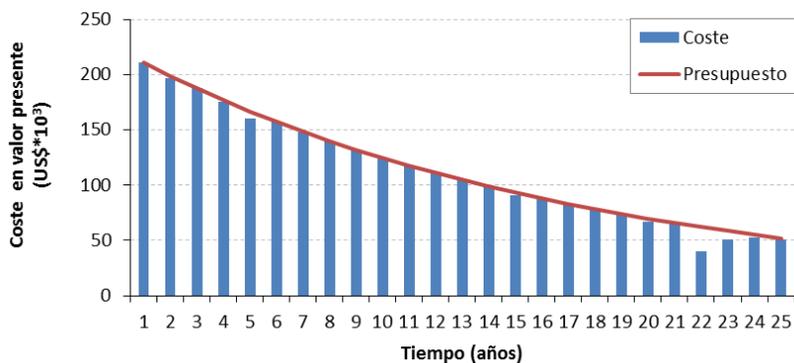


Figura Anexo 10: Flujo de costes de la solución óptima recomendada

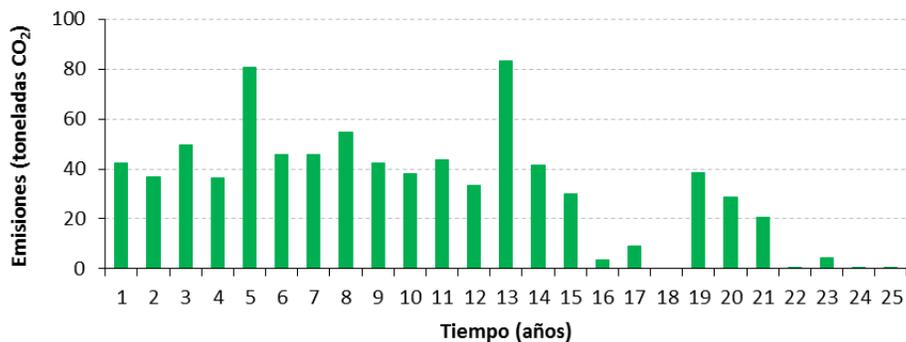


Figura Anexo 11: Flujo de emisiones de la solución óptima recomendada

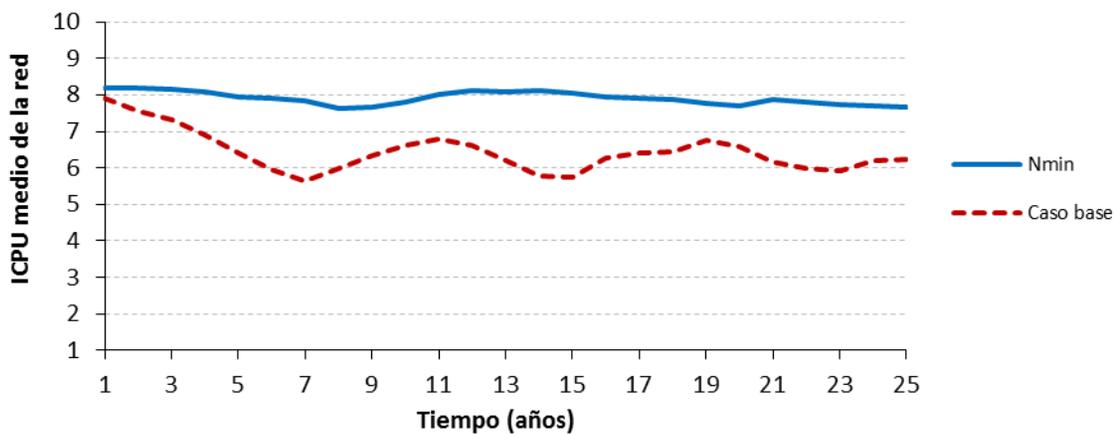


Figura Anexo 12: Condición media de la red con la solución óptima recomendada

Tabla Anexo 50: Programa de conservación de la solución óptima recomendada

		Año de análisis																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tramo	1	1	9	1	3	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1
	4	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3	1	1	1	1	1	2	1	1
	5	1	1	1	1	1	9	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	1	1	1	1
	6	6	3	1	3	1	5	1	1	3	1	3	5	1	3	3	1	3	1	3	8	1	3	3	1	3
	7	3	2	1	1	3	3	1	3	1	3	1	1	1	1	8	1	3	1	1	1	8	1	1	3	1
	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	3	1	2	2	1
	9	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1
	10	1	1	2	2	1	1	1	1	1	9	1	1	2	1	3	1	1	1	1	8	1	2	3	2	1
	11	101	102	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	9
	12	101	101	101	106	1	1	1	1	5	2	1	1	1	1	1	9	1	1	2	2	1	3	1	3	1
	13	101	101	101	101	101	101	106	1	1	4	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3	1	6	3	1	2
	14	101	101	101	101	101	101	104	1	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	3	3	1
	15	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	104	101	101	102	102	102	101
	16	101	101	102	101	101	101	101	105	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	3	2	1	3	1	3	8
	17	101	101	102	101	101	103	101	101	101	101	102	101	101	101	104	1	1	1	1	1	3	1	3	1	1
	18	101	101	101	101	101	106	1	1	1	2	1	3	1	3	1	5	2	1	1	1	1	1	1	9	1
	19	101	101	103	101	101	101	101	102	101	101	101	101	102	101	101	101	101	101	104	1	2	3	3	1	2
	20	101	101	101	101	101	101	101	106	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3	1	3	2	1

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

K.3. Solución óptima de mínimas emisiones (EMI_{min})

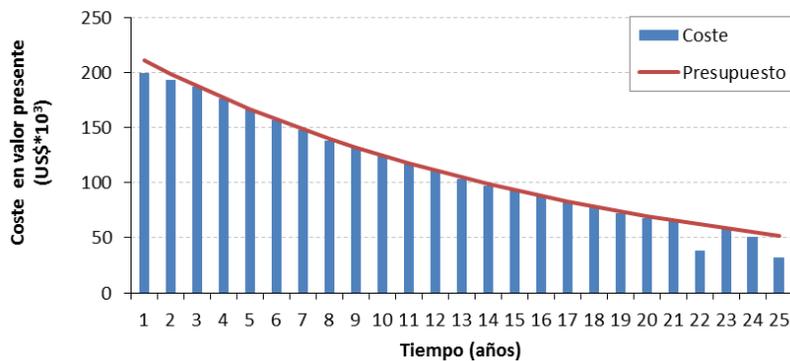


Figura Anexo 13: Flujo de costes de la solución óptima de mínimas emisiones

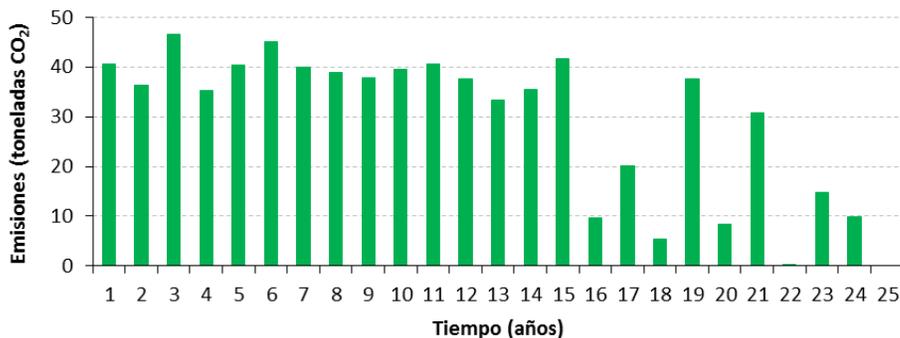


Figura Anexo 14: Flujo de emisiones de la solución óptima de mínimas emisiones

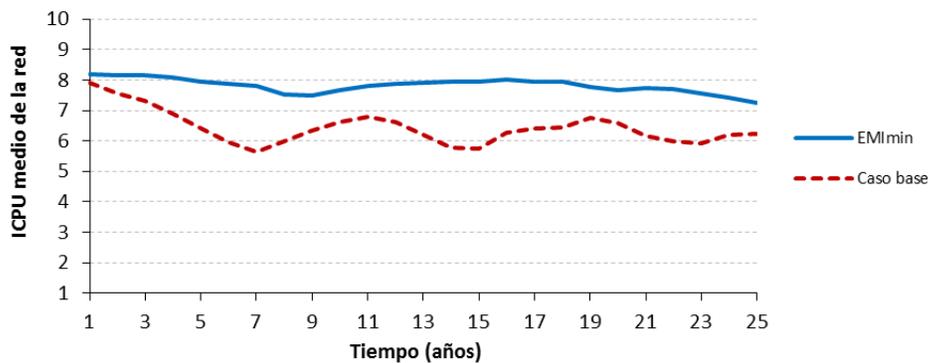


Figura Anexo 15: Condición cualitativa de la red con la solución de mínimas emisiones

Tabla Anexo 51: Programa de conservación de la solución de mínimas emisiones

		Año de análisis																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tramo	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3
	5	1	1	1	1	1	9	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	9	1	1	2	1	2	2	1	1
	6	5	2	1	1	5	1	1	5	3	1	5	1	3	1	3	1	3	1	3	3	1	3	1	2	1
	7	2	2	1	1	1	1	9	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	8	1	1	1	1	1	1	7
	8	1	2	2	1	1	1	1	1	9	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	8	1	2	1	1
	9	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
	10	1	2	2	1	2	1	1	1	1	9	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	8	2	1	1	1
	11	101	102	102	101	101	101	101	106	1	1	1	3	2	1	1	1	1	9	1	1	3	6	1	1	3
	12	101	101	101	106	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	9	1	1	2	2	1	3	7	1	1
	13	101	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101	101	101	106	1	1	3	3	1	3	3	3	1	6	3
	14	101	101	101	101	101	102	101	101	101	102	101	101	101	101	101	102	101	101	101	101	102	101	101	104	1
	15	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101
	16	101	101	101	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101	104	101	101	101	101	101	101	106	1	1	3	1
	17	101	101	101	101	104	1	1	1	2	1	2	1	3	1	1	1	1	3	1	3	1	3	1	3	3
	18	101	101	101	102	101	101	101	101	101	106	1	1	3	1	2	1	2	2	1	8	1	1	2	3	2
	19	101	101	103	101	101	101	104	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	2	1	3	1	3	3
	20	101	101	101	101	101	101	106	1	1	3	1	2	1	2	1	1	8	1	1	3	1	3	1	6	3

NOTA: Los tratamientos están identificados de acuerdo al código recogido en el Anexo F

Anexo L: Resultados del análisis de sensibilidad a restricciones presupuestarias

Tabla Anexo 52: Soluciones óptimas no dominadas en el estudio de variaciones porcentuales del presupuesto disponible

ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO₂]	Presupuesto [US\$]
3.799	954.799	2.712.934
3.797	953.519	2.712.934
3.988	877.399	2.855.720
3.984	809.855	2.855.720
3.936	792.349	2.855.720
3.934	725.464	2.855.720
4.150	768.818	2.998.506
4.094	646.657	2.998.506
4.048	639.606	2.998.506
4.241	757.316	3.141.292
4.173	756.024	3.141.292
4.169	664.750	3.141.292
4.043	629.290	3.141.292
4.148	646.308	3.141.292
4.290	799.403	3.284.078
4.263	764.958	3.284.078
4.246	699.072	3.284.078
4.213	647.805	3.284.078
4.186	646.130	3.284.078
4.352	805.647	3.426.864
4.320	642.220	3.426.864
4.275	629.431	3.426.864
3.799	954.799	2.712.934
3.797	953.519	2.712.934
3.988	877.399	2.855.720
3.984	809.855	2.855.720
3.936	792.349	2.855.720
3.934	725.464	2.855.720
4.150	768.818	2.998.506
4.094	646.657	2.998.506
4.048	639.606	2.998.506
4.241	757.316	3.141.292
4.173	756.024	3.141.292

Tabla Anexo 53: Soluciones óptimas en escenarios con variación porcentual del presupuesto

Variación presupuesto	ABC _{max}		EMI _{min}		N _{min}	
	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]
0,95	3.799	954.799	3.797	953.519	3.797	953.613
1,00	3.988	877.399	3.934	725.464	3.984	809.855
1,05	4.150	768.818	4.048	639.606	4.094	646.657
1,10	4.241	757.316	4.043	629.290	4.169	664.750
1,15	4.290	932.675	4.186	646.130	4.246	699.072
1,20	4.831	805.647	4.829	629.431	4.829	629.431

Tabla Anexo 54: Soluciones óptimas en escenarios con variación temporal del presupuesto

Escenario	ABC _{max}		EMI _{min}		N _{min}	
	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]	ABC [ICPU·años]	Emisiones [kg CO ₂]
Escenario 0	3.988	877.399	3.934	725.464	3.984	809.855
Escenario 9	3.996	713.652	3.965	660.625	3.996	713.652
Escenario 10	3.958	865.429	3.868	726.590	3.948	747.140

Anexo M: Publicaciones derivadas de la investigación

A continuación se recogen las referencias completas de las publicaciones derivadas de la investigación así como una copia (versión autor) de los artículos publicados en revistas científicas.

M.1. Artículos en revistas de impacto

Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., and Yepes, V. (2014). “An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level.” *Scientific World Journal*, 2014(524329).

Torres-Machí, C., Chamorro, A., Yepes, V., and Pellicer, E. (2014). “Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management.” *Revista de la Construcción*, 13(2), 49–56.

Torres-Machí, C., Chamorro, A., Pellicer, E., Yepes, V., and Videla, C. (2015). “Sustainable pavement management: How to integrate economic, technical and environmental aspects in decision-making.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Aceptado para publicación.

M.2. Ponencias en congresos

Torres-Machí, C.; Chamorro, A.; Pellicer, E.; Yepes, V.; y Videla, C. (2015) Sustainable pavement management: How to integrate economic, technical and environmental aspects in decision-making. *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, Washington, D.C., 11-15 January 2015. Paper 15-4773, pp. 1-13.

Torres-Machí, C., Chamorro, A., Pellicer, E., Yepes, V., Osorio, A., and Videla, C. (2014). “Herramienta de optimización heurística para la gestión de infraestructuras: aplicación a una red de pavimentos urbanos en Chile.” *11º Congreso Internacional Provia*, Valdivia, Chile. 20-24 Octubre 2014.

Torres-Machí, C.; Chamorro, A.; Pellicer, E.; y Yepes, V. (2014) Sustainable pavement management: How to integrate economic, technical and environmental aspects in decision-making. *10th Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management*, Virginia, EEUU, 20-21 Junio 2014.

Torres-Machí, C., Yepes, V., Pellicer, E., and Chamorro, A. (2014). “Application of simple and hybrid local search heuristics for the long-term optimization of pavement maintenance strategies at the network level.” *Transportation Research Board of the National Academies, Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Washington, D.C., EEUU. 12-16 January 2014. Paper 14-2247, pp. 1-11.

- Torres-Machí, C., Pellicer, E., Yepes, V., and Chamorro, A. (2013). “Heuristic Optimization Model for Infrastructure Asset Management.” *Advances in Artificial Intelligence*, Lecture Notes in Computer Science, C. Bielza, A. Salmerón, A. Alonso-Betanzos, J. I. Hidalgo, L. Martínez, A. Troncoso, E. Corchado, and J. M. Corchado, eds., Springer Berlin Heidelberg, 300–309.
- Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., and Yepes, V. (2013). “Optimization and prioritization methods for pavement network management.” Transportation Research Board of the National Academies, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, Washington, D.C., USA, 13-17 January 2013. Paper 13-5057, pp. 1-14.
- Torres-Machí, C., Yepes, V., Pellicer, E., and Chamorro, A. (2013). “Modelo de optimización para la gestión del mantenimiento de una infraestructura de edificación.” 2º Congreso Nacional – La enseñanza de las matemáticas en Ingeniería de Edificación, Valencia, España, 18-19 julio 2013, pp. 323-332. ISBN 978-84-8363-992-4

A continuación se recoge la versión del autor (versión *pre-print*) de los artículos publicados en el momento de finalización de la tesis doctoral.

Referencia del artículo: Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., and Yepes, V. (2014). "An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level." *Scientific World Journal*, 2014(524329).

AN ITERATIVE APPROACH FOR THE OPTIMIZATION OF PAVEMENT MAINTENANCE MANAGEMENT AT THE NETWORK LEVEL

Cristina Torres-Machí^{1,2}, Alondra Chamorro², Carlos Videla², Eugenio Pellicer¹, Víctor Yepes^{1,3}

¹ *Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain,*

E-mail: critorma@upv.es; pellicer@upv.es; vyepesp@cst.upv.es

² *Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, edif. San Agustín, piso 3, Santiago, Chile*

E-mail: achamorro@ing.puc.cl; cvidela@ing.puc.cl

³ *ICITECH, Department of Construction Engineering, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain*

Abstract. Pavement maintenance is one of the major issues of public agencies. Insufficient investment or inefficient maintenance strategies lead to high economic expenses in the long term. Under budgetary restrictions, the optimal allocation of resources becomes a crucial aspect. Two traditional approaches (sequential and holistic) and four classes of optimization methods (selection based on ranking, mathematical optimization, near optimization and other methods) have been applied to solve this problem. They vary on the number of alternatives considered and how the selection process is performed. Therefore, a previous understanding of the problem is mandatory to identify the most suitable approach and method for a particular network. This study aims to assist highway agencies, researchers and practitioners on when and how to apply available methods based on a comparative analysis of the current state of the practice. Holistic approach tackles the problem considering the overall network condition; while the sequential approach is easier to implement and understand, but may lead to solutions far from optimal. Scenarios defining the suitability of these approaches are defined. Finally, an iterative approach gathering the advantages of traditional approaches is proposed and applied in a case study. The proposed approach considers the overall network condition in a simpler and more intuitively manner than with a holistic approach.

1. Introduction

Pavement Management Systems (PMS) should assist agencies in the decision making process about which sections of a pavement network should be preserved, maintained and/or rehabilitated (P+M+R) under budgetary constraints. To address this, a systematic and rational method is needed to ensure an optimal allocation of scarce resources. Studies carried out by the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC) and the German Agency for Technical Cooperation (GTZ) have shown that between 1% and 3% of gross domestic product is consumed each year unnecessarily due to the lack of road network management [1]. At the same time, users are increasingly demanding in terms of quality, comfort, and safety. Therefore, the design of maintenance programs becomes a crucial aspect when defining the questions about which section to treat, which treatment to apply and when this treatment must be applied. For this analysis, PMS must integrate three management levels varying on the information detail and complexity of models considered in the decision making: strategic, network and project level. This study focuses on management at the network level, whose primary purpose is the design of the network maintenance program, within overall budget constraints. In order to evaluate the suitability of maintenance programs at the network level, PMS integrate and coordinate four specific modules (Figure 1) [2]:

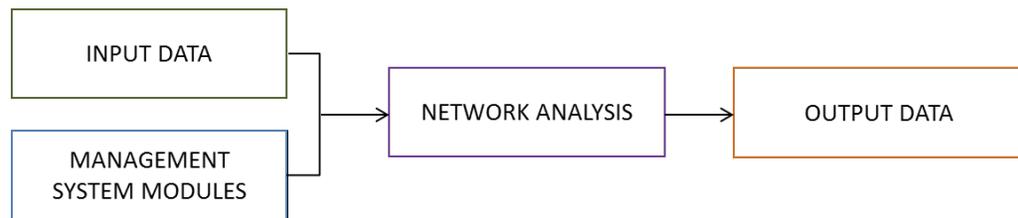


FIGURE 1. Modules in a PMS used to evaluate the suitability of maintenance programs at the network level

- Input data: Data required for the network analysis are inventory data per road, network present condition, performance models (including the evolution of pavement condition and the effect of P+M+R treatments) and strategic level data. Strategic level data include strategic targets (i.e. trigger level of service, environmental policies, institutional scopes and objectives), available budget, analysis period and discount rate for long term economic analysis.
- Management system modules: This module evaluates the suitability of maintenance alternatives. If a sustainable management is implemented, the evaluation has to consider, in an integrated manner, five aspects throughout the pavement life cycle: economic, social, technical, environmental and political [3-5]. Different indicators have been used for assessing these sustainable aspects. For example: present worth cost or cost effectiveness as economic indicators; safety and comfort as social indicators; roughness as an indicator of technical performance; air pollution due to vehicle emissions as environmental indicator; and sections' functional class as a political indicator. Once aspects to consider have been selected, managers at the strategic level have to define the decision making criteria, that is, how these sustainable aspects will be considered for evaluating and comparing the suitability of maintenance alternatives.
- Network analysis: Based on information from input data and management system modules, this module seeks the optimal maintenance program at the network level.
- Output data: It mainly consists of the maintenance program at the network level and pavement condition over the analysis period. It could also include recommendations to adjust strategic targets.

Once input data and management system modules are defined, the optimal design of maintenance programs is not straightforward. Indeed, it presents S^{TxN} possible solutions in a network with N sections, S possible P+M+R treatments over a planning horizon of T years [6]. Given this scenario, two approaches have been identified in the literature to allow the optimization process: sequential and holistic [7, 8]. These approaches are referred to how the optimization problem is tackled. Sequential approach deals with the problem in two phases. It first defines the treatment strategy on a section by section analysis. Once the P+M+R treatments and timings are defined for each section, it selects the sections to treat until available budget is exhausted. This sequential approach simplifies the problem by evaluating $N \times S^T$ possible solutions. On the other hand, holistic approach tackles the problem as a whole, before any specific section or treatment strategy is defined. Therefore, it deals with the S^{TxN} solutions of the problem. In addition to these two possible approaches of the problem, different methods can be applied to look for the optimal maintenance program. These optimization methods vary on the number of evaluated alternatives and how the selection is carried out and they can be applied considering either sequential or holistic approach. There is no specific approach and optimization method appropriate to all possible scenarios; therefore, a previous understanding of the problem within an agency is mandatory to identify the most suitable approach for a particular network [8].

Previous works in other research areas (i.e. bridge management and construction engineering) have analyzed the use of existing optimization methods in the decision making process [9, 10]. With respect to pavement management, previous works have analyzed how pavement agencies select the projects to undertake [8, 11]. In 1995, simplistic approaches were detected in most of the American and Canadian agencies. This was mainly due to the lack of computers to undertake more reliable analysis [8]. Recent advances in computer technologies make necessary an update of

optimization methods to tackle the problem of designing maintenance programs. A recent study reviews optimization techniques applied to pavement management with special attention to genetic algorithms [11]. However, this review neither compares existing optimization methods nor considers the traditional approaches of the problem (sequential or holistic). Having detected this gap in the literature, the present study aims to assist highway agencies, researchers and practitioners on when to apply and how to apply available optimization methods for the optimal design of maintenance programs at network level.

The objective of this study is to recommend the most suitable approaches and optimization methods for the design of maintenance programs under different scenarios. Based on an analysis of the current state of the practice, this study proposes an iterative approach that gathers the advantages of traditional approaches (sequential and holistic) by considering the overall network condition in a simpler and more intuitively manner than with a holistic approach.

The study is part of a three year project developed in Chile by the Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) and named Fondef D09I1018 "Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile" (Research and Development of Solutions for Urban Pavement Management in Chile). The project is being partnered and advised by the Centre for Pavement and Transportation Technology (CPATT) of the University of Waterloo, Canada. The overall project resulted to accomplish the current and future needs of urban pavements, and provide effective management tools to assist agencies that manage urban networks in decision making. Even though the project is being developed in Chile, the expected outcomes, such as technical tools and the resulting Urban Pavement Management System, may be adapted and adopted in other countries for urban pavement management.

2. Study Methodology

To achieve the proposed objective, a four step research method is proposed:

- Review of existing optimization methods applied to pavement management including existing applications in available PMS under traditional approaches (sequential and holistic).
- Comparative analysis of reviewed approaches and optimization methods, identifying their advantages and limitations. Based on this analysis, recommendations of the most suitable approach and optimization method to implement in future PMS are driven considering different scenarios.
- Proposal of an iterative approach gathering the advantages of traditional approaches.
- Application of the proposed iterative approach in an illustrative case study and comparison to traditional approaches.

3. Selection and Optimization of Maintenance Treatments

As shown in Table 1, several optimization methods are available for the design of maintenance programs at the network level. They mainly vary on the number of alternatives considered. Therefore, they are related to the considered approach: sequential approach deals with $N \times S^T$ alternatives, while holistic approach considers $S^{T \times N}$ possible solutions (Table 2). Indeed, the suitability of an optimization method relies on the number of alternatives under evaluation: when the number of alternatives is small, they can be selected based on a ranking. In contrast, when the number of alternatives is large, it becomes necessary to use mathematical or near optimization methods. These optimization methods are reviewed in this section including applications in available PMS.

TABLE 1. Reviewed optimization methods consider either sequential or holistic approach

Optimization method	Sequential approach		Holistic approach
	Treatment strategy	Section selection	
Selection Based on Ranking	Judgment	A20	
	Pavement Condition	A19	
	Economic Analysis	A20	A8, A20
Mathematical Optimization Methods	Linear and Non Linear Programming	A12	A1, A6, A13
	Integer Programming	A16	A17, A9, A22
	Dynamic Programming	A8	A7, A11, A23
Near Optimization or Heuristic Methods	Incremental Benefit/Cost Analysis	A18	A2, A18
	Local Search Heuristics	A5, A21	
	Evolutionary Algorithms	A11	A3, A7, A4, A14
Other Optimization Methods	Neural Networks		A10
	Fuzzy Logic		A15

NOTE: Code reference (A1, A2, ..., A23) are defined in Table 2.

Table 2. Number of alternatives and type of approach considered in reviewed applications

Code	Author	Problem			Approach		Reference
		<i>N</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	Alternatives	Sequential	
A1	Amador-Jiménez and Mrawira	3	-	30	3 ³⁰	x	[12]
A2	Chamorro	39	4	10	39 x 4 ¹⁰	x	[2]
A3	Chan <i>et al.</i>	500	-	-	500	x	[13]
A4	Chootinan <i>et al.</i>	35	4	10	4 ³⁵ x 10		x [14]
A5	Chou and Le	1	15	15	15 ¹⁵	x	[15]
A6	de la Garza <i>et al.</i>	5	9	15	9 ⁵ x 15		x [16]
A7	Farhan and Fwa	150	4	1	150 x 4 ¹	x	[17]
A8	Feighan <i>et al.</i>	14	5	5-15	14 x 5 ¹⁵	x	[18]
A9	Ferreira <i>et al.</i>	27	6	4	6 ²⁷ x 4		x [19]
A10	Fwa and Chan	128	-	-	128	x	[20]
A11	Fwa and Fahrhan	150	4	1	150 x 4 ¹	x	[21]
A12	Gao and Zhang	-	4	5	4 ⁵	x	[22]
A13	Gao <i>et al.</i>	3	4	10	4 ³ x 10		x [23]
A14	Meneses and Ferreira	32	7	20	7 ³² x 20		x [24]
A15	Moazami <i>et al.</i>	131	-	-	131	x	[25]
A16	Ng <i>et al.</i>	-	4	5-10	4 ¹⁰	x	[26]
A17	Odoki	100	16	5	x	x	[27]
A18	and Kerali	400	17	12	x	x	[27]
A19	Reddy and Veeragavan	52	-	-	52	x	[28]
A20	Shah <i>et al.</i>	21	4	10	21 x 4 ¹⁰	x	[29]
A21	Tsunokawa <i>et al.</i>	-	5	20	5 ²⁰	x	[30]
A22	Wang <i>et al.</i>	10	5	5	5 ¹⁰ x 5		x [31]
A23	Yoo and Garcia-Diaz	40	4	7	4 ⁴⁰ x 7		x [32]

3.1 Selection based on ranking

Selection based on ranking is performed by enlisting and rating alternatives based on an indicator. This indicator can be based on judgment, pavement condition or economic analysis.

When based on judgment, agencies determine from an expert panel a criterion to rate and rank alternatives. Shah *et al.* [29] applied this method to select the sections to treat in a road network in India considering criteria such as traffic, connectivity and road and drainage conditions.

Selection based on pavement condition ranks sections to treat considering either a Single or a Composite Condition Index. Single Condition Index is normally based on roughness or structural index, whereas Composite Condition Index often considers pavement condition and functional classification. A Composite Condition Index considering pavement surface distresses, traffic information and expert opinion is used by Reddy and Veeragavan [28] for selecting sections to treat on a network of 52 sections.

Ranking based on economic analysis allows a rational comparison among alternatives because it considers costs and benefits. This method was used by Shah *et al.* [29] under a sequential approach. Firstly, for each section, four maintenance strategies were ranked based on a benefit cost ratio. This economic indicator was also used to rank sections to treat. Another application of ranking based on economic analysis has been implemented in MicroPaver PMS using the cost effectiveness for selecting the sections to treat [18].

3.2 Mathematical optimization methods

Mathematical optimization methods select alternatives maximizing or minimizing an objective function while satisfying some constraints. Objective functions commonly considered are: maintenance costs, vehicle operating costs and effectiveness, among others [2, 6, 33]. Mathematical programming methods most commonly used for pavement management are: linear, nonlinear, integer and dynamic programming. They are discussed in detail below.

Linear and nonlinear programming seek optimal solutions using continuous variables. The main difference is that the former considers linear functions correlated with time, while the latter may consider curvilinear dependency [8]. These optimization methods have been applied using both holistic [16, 23] and sequential approaches [12, 22]. Under the sequential approach, these methods have been used to optimize the treatment strategy at the section level [22] and the sections to treat at the network level [12].

Integer programming simplifies the analysis by considering two variables: a do nothing alternative or to do something. Applications are found using both sequential [26, 27] and holistic approaches [19, 31]. Regarding sequential approach, Ng *et al.* [26] optimized the treatment strategy at the section level, while Odoki and Kerali [27] implemented this procedure in HDM-4 PMS to select sections to treat at the network level. However, due to the complexity of the calculation, HDM-4 limits this analysis to networks with less than 100 sections, 16 treatments and five years [27].

Dynamic programming is used in situations that require a number of sequential decisions. This optimization method starts at the desired final solution and works backwards to find the optimal value of variables. Dynamic programming has been applied using holistic [32] and sequential approaches for the treatment strategy optimization [18] and the section selection [17, 21].

3.3 Near optimization or heuristic methods

Near optimization methods, also called heuristic methods, give solutions that are close approximations to those derived from mathematical optimization. These optimization methods start with an initial solution and look for better solutions within the constraints. They differ in how they search for better solutions: incremental benefit/cost analysis, local search heuristics and evolutionary algorithms.

Incremental benefit/cost analyzes the benefits gained by selecting alternatives with higher costs. This optimization method is often referred to as the efficiency frontier. This frontier is defined in a plot of benefit against cost and gathers the alternatives with higher benefits given a certain

cost. Incremental benefit/cost analysis is implemented in HDM-4 PMS under a sequential approach for selecting the maintenance strategy and the sections to treat. However, HDM-4 limits this application to a maximum of 400 sections, 17 treatment alternatives and a 12 year analysis period [27]. Incremental benefit/cost has also been applied to prioritize sections to treat in unpaved networks [2].

Local search heuristics start with random initial solution and explores the solution inference space seeking for better feasible solutions. Different local search heuristic can be implemented: gradient search, threshold acceptance, simulated annealing, etc. These heuristics have been applied under a sequential approach to optimize a road section treatment strategy: Tsunokawa *et al.* [30] looked for the overlay thickness maximizing benefits; while Chou and Le [15] considered two objectives, minimal cost and maximal reliability.

Evolutionary algorithms (EA) mimic the natural evolution guided by learning and adaptation. Among EA, genetic algorithms are one of the most applicable optimization method in infrastructure management [34]. They have been applied using both sequential (optimal treatment strategy [21] and section selection [13]) and holistic approaches [14, 17, 24].

3.4 Other optimization methods

This section gathers optimization methods that assist decision making in managing pavement maintenance at the network level but they cannot be categorized in the above groups as neural networks and fuzzy logic.

Neural networks are able to learn from examples, enabling these systems to make generalizations and simulate decisions. Fwa and Chan [20] developed a neural network based on the priority ratings awarded by engineers. After the training phase, it provided rating scores to road sections based on their condition.

Fuzzy logic systems incorporate imprecise qualitative data in the decision making. Moazami *et al.* [25] applied a fuzzy logic system in a network with 131 sections. In this system, sections were characterized by: condition, traffic, road width and treatment cost. The fuzzy logic system transformed the quantitative values of these parameters into linguistic values that classified priority in three levels: low, medium or high.

4. Comparative analysis and recommendations

This section analyzes the advantages and limitations of reviewed optimization methods and recommends the most suitable methods and approaches for future implementation in PMS under various scenarios. Finally, an iterative approach gathering the advantages of sequential and holistic approaches is proposed.

4.1 Advantages and limitations of the reviewed optimization methods

Selection based on ranking is easy to understand but it can only deal with a limited number of alternatives. Ranking based on judgment is the simplest method, but it may be subject to bias and inconsistency resulting in solutions far from optimal [7]. Ranking based on condition is more objective than judgment. However, it does not consider the effect of alternatives on pavement condition over time. Therefore, Amador-Jiménez and Mrawira [12] have defined optimization based on ranking as the least cost effective method. Finally, ranking based on economic analysis allows a rational comparison that includes costs and benefits. Being simple to use, it leads to solutions closer to optimal than other ranking methods [7]. However, it fails to consider externalities that are difficult to monetize.

Mathematical optimization methods provide optimal solutions but they are not suited to deal with large networks. Indeed, mathematical optimization methods cannot handle large number of decision variables because this increases the complexity of the problem and requires long computing time.

In contrast, near optimization or heuristic methods provide simpler and more efficient solutions to large optimization problems. They are suitable to tackle the maintenance management at the network level leading to "good/near optimal" solutions [6]. Heuristic methods, however, should be compared to optimization methods to ensure that they are representing optimal or near optimal solutions [8].

Regarding other optimization methods, neural networks are useful to replicate a pattern and make generalizations. However, they do not guarantee the suitability of the decision taken and they act as a "black box", being not possible to easily extract the path followed to explain a solution. Finally, fuzzy logic enables to introduce rules from experience or intuition but it has not formal algorithms to learn from existing data [34].

4.2 Recommendations of approaches and optimization methods

Reviewed applications show a greater reliance on mathematical optimization and near optimization rather than on ranking (Table 1). In addition to this, applications highlight the versatility of the optimization methods for solving the problem. On one hand, an optimization method (dynamic programming, for example) can be implemented under a sequential (A7, A8 and A11 in Tables 1 and 2) or a holistic approach (A23 in Tables 1 and 2). On the other hand, different optimization methods can be combined for solving the same problem. For example, Fwa and Fahren [21] (A11 in Tables 1 and 2) used a genetic algorithm for optimizing the treatment strategy and subsequently applied dynamic programming for optimizing section selection; while Feighan *et al.* [18] (A8 in Tables 1 and 2) combined dynamic programming and selection based on ranking. Therefore, the suitability of an optimization method should be analyzed in conjunction with the approach of the problem.

Sequential approach simplifies the problem making it easier to understand than holistic approach because it defines first the treatment strategy and then selects the sections to treat. Nevertheless, sequential approach ignores the effect on the network as a whole. This may lead to recommend sequential approach for homogeneous or reduced networks in which the overall performance is less compromised by the section by section analysis. Regarding optimization methods, all the analyzed methods (ranking, optimization and near optimization) have been used under the sequential approach. The recommendation on the optimization method to use would depend on the characteristics of a specific problem. In broad terms, selection based on judgment or condition should be avoided, as they may introduce bias and does not consider the effect of alternatives over time.

Holistic approach enables to analyze network maintenance alternatives as a whole, before any specific treatment strategy or section has been selected. However, this increases the complexity of the problem, making necessary to use optimization and near optimization methods (Table 1). Reviewed applications using mathematical optimization methods show a trend of limiting the number of variables considered while near optimization methods are able to handle the problem without sacrificing its complexity. For example, the most complex application using optimization considered 6^{108} alternatives ([19], A9 in Tables 1 and 2), while near optimization has optimized a problem with 7^{640} alternatives ([24], A14 in Tables 1 and 2). Therefore, holistic approach using near optimization methods may be recommended to deal with large networks. Nevertheless, results are suggested to be periodically compared to mathematical optimization methods.

4.3 Proposed iterative approach

Gathering the advantages of sequential and holistic approaches, an iterative approach is proposed as shown in Figure 2. Based on a sequential structure, the iterative approach includes iterations between the selection of treatment strategies and sections looking for a more holistic view of the problem. The proposed approach optimizes first the treatment strategy at the section level. In this optimization, the iterative approach collects a set of optimal and suboptimal solutions. This set of solutions is then considered when selecting the sections to treat at the network level. In this selection, iterations are made looking for the optimal selection of treatment strategies and sections while satisfying budgetary restrictions.

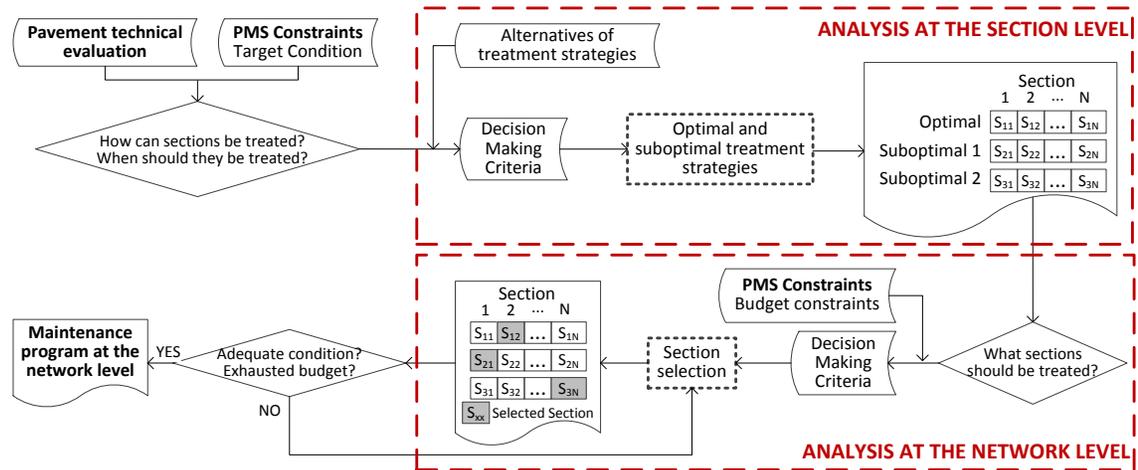


FIGURE 2. Decision making process of the proposed iterative approach

The main difference between sequential and iterative approach is that the latter may select suboptimal treatment strategies for a certain section. On the contrary, reviewed applications considering a sequential approach only consider optimal solutions in the selection of treatment strategies. Therefore, iterative approach enables a deterioration of a solution at the section level if it leads to an improvement of the overall solution at the network level. As a result, the proposed iterative approach considers the overall network condition in a simpler and more intuitively manner than holistic approach.

Several of the reviewed optimization methods (ranking, optimization and near optimization) may be used considering the proposed iterative approach. As the proposed approach considers two optimizations (treatment strategy and section selection), reviewed optimization methods may be combined. Indeed, iterations are also considered in the reviewed incremental benefit/cost analysis, as shown in the application of Videla and Gaete [35]. The main difference is that incremental benefit/cost analysis only compares solutions in the efficiency frontier. In contrast, the proposed iterative approach may select suboptimal solutions that are not placed in the efficiency frontier. The recommendation of the most suitable optimization method would depend on the number of alternatives to evaluate. If the number of alternatives is reduced, ranking based on economic analysis may be suitable. In contrast, optimization or near optimization methods would be more suitable when dealing with a large number of alternatives. Finally, as the proposed iterative approach considers two optimizations, it enables to consider different criteria or objective functions in the selection of treatment strategy and sections to treat. This would therefore facilitate the sustainable management of pavement networks because sustainable aspects, such as economic, social, technical, environmental and political, may be considered in different optimizations depending whether they impact at the network or project level.

5. Case study

An illustrative case study is presented to compare the maintenance program obtained under traditional approaches (holistic and sequential) and the proposed iterative approach. The analyzed network, composed of five flexible pavements, is subject to both technical and budgetary restrictions. Each of the sections has a set of six possible rehabilitation treatments and a deterministic deterioration model adopted from Khurshid *et al.* [36]. Pavement condition is assessed in terms of Present Serviceability Index (PSI) using the regressions proposed by Hall *et al.* [37]. All the sections present similar characteristics in terms of geometry (1000 m length and 3.7 m width), climate (Average Annual Freeze Index of 400 Celsius days) and traffic (Average Annual Truck Traffic Volume of 0.8 million) while differing on their initial condition (Table 3).

TABLE 3. Characteristics of sections considered in the case study

Section	Type	Time since last rehabilitation
---------	------	--------------------------------

		(years)
1	Minimal SP with 102 mm ACO	15
2	Minimal SP with saw and seal 102 mm ACO	20
3	Intensive SP with 102 mm ACO	20
4	Crack break and seat section with 102 mm ACO	25
5	Crack break and seat section with 203 mm ACO	25

NOTE: SP = Surface Preparation; ACO = Asphalt Concrete Overlay.

The maintenance program seeks to maximize long term effectiveness (*LTE*) over a period of 25 years subject to budgetary restrictions. *LTE* of maintenance alternatives is assessed by the area bounded by the pavement performance curve (*ABPC*) and a threshold value ($PSI \geq 2$, in this case study) (Figure 3), weighted by traffic and section length [33, 38, 39] (1). The measure of *ABPC* is based on the fact that a well maintained pavement (having therefore a larger *LTE*) provides greater benefits than a poorly maintained pavement [36, 38, 39]. In order to compare alternatives with different costs, the ratio cost effectiveness (*C/E*) (2) is normally considered [33, 39].

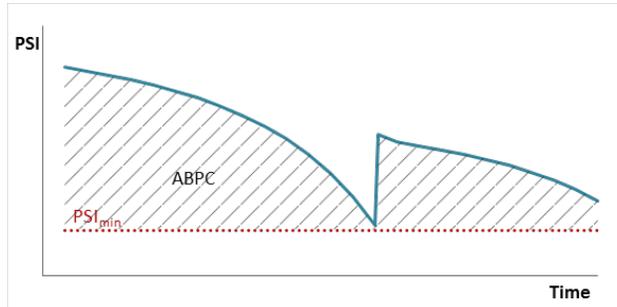


FIGURE 3. Long term effectiveness of a maintenance alternative

$$LTE = ABPC \cdot L \cdot AADT \quad (1)$$

$$C/E = LTE/TPWC \quad (2)$$

Where,

LTE = Long Term Effectiveness

ABPC = Area Bounded by Performance Curve and a threshold value (Figure 3).

L = section length.

AADT = Annual Average Daily Traffic

C/E = Cost effectiveness

TPWC = Total Present Worth Cost

This case study considers an available budget (in terms of total present worth cost, *TPWC*) 50% higher than the minimal cost solution that ensures a *PSI* greater than 2. This minimal cost solution (58 220 €) is taken as a base case to compare solutions obtained using different approaches. Although this case study considers an available budget higher than the minimal cost scenario, the proposed approach could deal with lower budgets. In fact, the ultimate goal of the proposed iterative approach is to assist pavement managers on the optimal design of maintenance programs subject to budgetary restrictions. Therefore, other budgetary scenarios could be similarly considered.

A local search heuristic based on simulated annealing was implemented on Matlab 12 in order to look for optimal solutions. Simulated annealing is based on the analogy of crystal formation from masses melted at high temperature and let cool slowly [40]. This method presents the advantage of escaping from local optima by enabling, under some conditions, the degradation of a solution. This heuristic method, previously implemented by the authors, has led to successful results in large optimization problems [41], [42]. Nevertheless, other optimization methods could be implemented. Indeed, the objective of this application is to analyze the effect of reviewed approaches and not to assess the suitability of the optimization method. The optimization process developed under each approach is the following:

- Holistic approach: it consists on the optimization of *LTE* (1) satisfying both technical and budgetary restrictions ($PSI \geq 2$ and $TPWC \leq 87\,330$ €, respectively).
- Sequential approach: it first optimizes the maintenance strategy at the section level by maximizing the incremental cost effectiveness (*IC/E*, hereafter) (4) while satisfying $PSI \geq 2$. Once the optimal maintenance strategy is defined for each pavement, sections with higher *IC/E* (4) are selected until the budget is depleted.

- **Iterative approach:** it considers the set of three best maintenance strategies for each section based on their incremental cost effectiveness (IC/E) (4) assuring that $PSI \geq 2$. This set of optimal and suboptimal maintenance strategies is then considered at the network level looking for the maximal LTE (1) while satisfying budget constraint. Therefore, this approach enables the deterioration of a solution at the section level if this would enhance the overall LTE .

$$IC = TPWC - TPWC_0 \tag{3}$$

$$IC/E = LTE - LTE_0 / TPWC - TPWC_0 \tag{4}$$

Where,

IC = Incremental cost of the alternative compared to minimal cost alternative.

$TPWC$ = Total Present Worth of the alternative being evaluated.

$TPWC_0$ = Total Present Worth of minimal cost alternative.

LTE = Long Term Effectiveness of alternative being evaluated (assessed by (1)).

LTE_0 = Long Term Effectiveness of minimal cost alternative (assessed by (1)).

Sequential and iterative approaches tackle the design of maintenance program by optimizing first the incremental cost effectiveness (IC/E , (4)) of maintenance strategies for each section in the network (Table 4). The main difference is that, when selecting the sections to treat at the network level, reviewed applications considering a sequential approach only retain optimal maintenance strategies (Optimal solutions in Table 4). Meanwhile, iterative approach considers optimal and suboptimal solutions.

Table 4. Optimal and suboptimal treatment strategies considered in the iterative approach

Treatment Strategy	Section 1		Section 2		Section 3		Section 4		Section 5	
	IC (€)	IC/E								
Optimal	40 773	0.88	14 802	3.84	20 343	1.47	43 183	0.94	19 970	1.18
Suboptimal 1	53 220	0.71	33 251	2.38	43 470	1.36	55 349	0.73	26 725	0.88
Suboptimal 2	11 248	0.67	32 136	2.29	54 550	1.10	68 002	0.60	39 339	0.60

Table 5. Treatment strategies for the different sections of the network under different approaches

	Sequential	Holistic	Iterative
Section 1	MC	MC	Suboptimal 2
Section 2	Optimal	Holistic optimal	Optimal
Section 3	MC	MC	MC
Section 4	MC	MC	MC
Section 5	MC	MC	MC

NOTE: MC corresponds to minimal cost treatment strategy.

Considering that the available budget is 50% higher than the minimal cost solution, there is an additional budget of 29 110 €. With this budgetary restriction for improving the network from the minimal cost scenario, sequential approach will solve the optimization problem by only treating Section 2 with the optimal solution (Table 5). It is the first ranked solution in terms of IC/E and the cost of the next ranked solution (Section 3 – Optimal Solution) would exceed available budget. However, this solution does not deplete available funds because there is no other optimal solution whose cost does not exceed available budget (Figure 4).

Iterative approach, in contrast, enables the selection of suboptimal solutions at the section level looking for an increase in overall performance (Figure 5). Therefore, iterative approach will treat Section 2 with its optimal solution but it will also treat Section 1 with suboptimal solution 2 (Table 5). This combination results in a total cost closer to the available budget than sequential approach solution (Figure 4). As a result, a higher performance at the network level both in terms of average PSI is obtained under iterative approach (Figure 5).

Finally, holistic approach selects a maintenance program based on minimum cost solution except of section 2, which is treated with a strategy different to those defined as optimal and

suboptimal in the section by section analysis. This treatment is referred as “holistic optimal” (Table 5). In relation to costs and effectiveness, holistic approach nearly depletes available budget (Figure 4) but it does not necessarily ensure an efficient allocation of funds. Indeed, iterative approach leads to a better solution in terms average PSI with a lower cost than holistic approach (Figures 4 and 5).

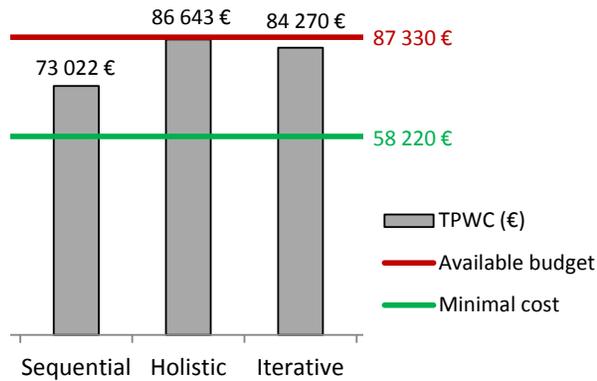


FIGURE 4. Total Present Worth of solutions under different approaches

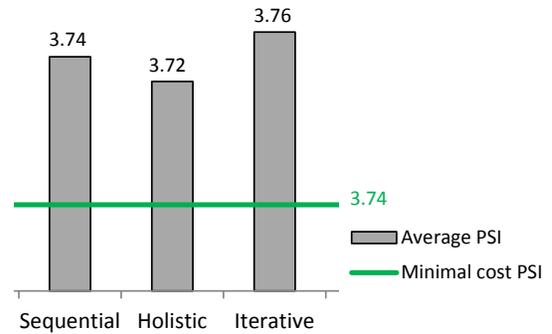


FIGURE 5. Average PSI of the network under different approaches

From this numerical application it can be concluded that the proposed iterative approach leads to more efficient solutions than sequential approach while considering the overall network condition in a simpler and more intuitively manner than holistic approach.

6. Conclusions

From the literature review, two approaches are identified in the design of maintenance programs at the network level: holistic and sequential approach. The former tackles the problem as a whole, before any specific section or treatments is defined, dealing with the S^{TxN} possible solutions of the problem. Sequential approach tackles the problem considering a two steps process. It first optimizes the maintenance strategy at the section level. Then, budget is allocated across various sections in the network. This process simplifies the problem to $N \times S^T$ alternatives.

Different optimization methods can be applied in the design of the maintenance programs at the network level considering either sequential or holistic approach: selection based on ranking, mathematical optimization, near optimization or heuristic methods and other optimization methods. From the revision of these optimization methods and their applications it can be concluded that:

- Ranking systems are easy to understand, but they can only be used when the number of alternatives is limited and they often ignore future needs.
- Mathematical optimization methods provide optimal solutions, but they require long computing time. They may not be feasible for a large network with long period of analysis.
- Near optimization methods give near optimal solutions with less computational effort than mathematical optimization methods. They can handle large number of decision variables and are suitable to solving combinatorial optimization problems.
- Other optimization methods, such as neural networks and fuzzy logic can replicate a pattern, but they do not guarantee the suitability of the decision taken.

Based on the advantages and limitations of the reviewed optimization methods and their applications under holistic and sequential approaches, several recommendations can be driven for future implementation in PMS.

- Sequential approach is easy to understand but it fails to consider the effect on the network as a whole. It may be recommended for the analysis of homogeneous or reduced networks, in which the overall performance of the network is less compromised by the section by section analysis.

- Holistic approach analyzes network maintenance alternatives as a whole, before any specific treatment strategy or section has been selected. However, this increases the complexity of the problem, making necessary to use optimization and near optimization methods. Reviewed applications of mathematical optimization methods using holistic approach show a trend of simplifying the problem or limiting the number of variables (sections, treatments and/or analysis period). Meanwhile, near optimization methods are able to solve the problem under a holistic approach with no sacrificing its complexity. Therefore, holistic approach using near optimization methods may be recommended when dealing with large networks.

Finally, an iterative approach is proposed and applied to an illustrative case study. This approach gathers the advantages of sequential and holistic approaches leading to more intuitive and effective design of maintenance programs at the network level. Based on a sequential structure, the proposed iterative approach includes iterations between the selection of treatment strategies and sections to treat looking for a more holistic view of the problem. In this iteration process, the proposed iterative approach may select suboptimal treatment strategies for a certain section if it leads to an improvement of the overall solution at the network level. As a result, the proposed iterative approach considers the overall network condition in a simpler and more intuitively manner than holistic approach.

Acknowledgements

Authors gratefully acknowledge members of the research group at the Pontificia Universidad Católica de Chile for their contributions and resources during the study. The research team acknowledges Conicyt-Fondef/Decimoséptimo Concurso de Proyectos de Investigación y Desarrollo del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, Fondef/Conicyt 2009 (D09I1018) for funding this project. Support of the associated institutions is also appreciated: Ministry of Housing and Urban Development (Ministerio de Vivienda y Urbanismo), Regional Government for Metropolitan Region (Gobierno Regional de la Región Metropolitana), Municipality of Santiago (Municipalidad de Santiago) and Municipality of Macul (Municipalidad de Macul). Funding over Santander Universidades (Becas Iberoamérica Jóvenes Profesionales e Investigadores, 2013) to support this work is sincerely appreciated.

References

- [1] A. Schliesser and A. Bull, *Road Network Management: A New Approach to Road Management and Conservation*. Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), United Nations. Santiago, Chile, 1992.
- [2] A. Chamorro, "Development of a Sustainable Management System for Rural Road Networks in Developing Countries", University of Waterloo, Canada, 2012.
- [3] J. Qin, L. Ni, and F. Shi, "Mixed Transportation Network Design under a Sustainable Development Perspective", *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013.
- [4] A. Chamorro and S. L. Tighe, "Development of a management framework for rural roads in developing countries: Integrating socioeconomic impacts", *Transportation Research Record*, vol. 2093, pp. 99–107, 2009.
- [5] C. Torres-Machi, V. Yepes, J. Alcalá, and E. Pellicer, "Optimization of high-performance concrete structures by Variable Neighborhood Search", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 90–99, 2013.
- [6] A. Golroo and S. Tighe, "Optimum Genetic Algorithm Structure Selection in Pavement Management", *Asian Journal of Applied Sciences*, vol. 5, no. 6, pp. 327–341, 2012.
- [7] R. C. G. Haas, W. R. Hudson, and J. P. Zaniewski, *Modern Pavement Management*, Original ed. Krieger Pub Co, 1994.
- [8] K. A. Zimmerman, *Pavement Management Methodologies to Select Projects and Recommend Preservation Treatments*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of the Highway Practice 222, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1995.
- [9] S.L. Hsueh and M.-R. Yan, "A Multimethodology Contractor Assessment Model for Facilitating Green Innovation: The View of Energy and Environmental Protection", *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013.
- [10] Y. Jiao, H. Liu, P. Zhang, X. Wang, and H. Wei, "Unsupervised Performance Evaluation Strategy for Bridge Superstructure Based on Fuzzy Clustering and Field Data", *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013.
- [11] M. Harvey, *Optimising Road Maintenance*. International Transport Forum Discussion Papers, No. 2012/12, OECD Publishing., 2012.
- [12] L. E. Amador-Jiménez and D. Mrawira, "Roads Performance Modeling and Management System from Two Condition Data Points: Case Study of Costa Rica", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 135, no. 12, pp. 999–1007, 2009.

- [13] W. T. Chan, T. F. Fwa, and J. Y. Tan, "Optimal Fund-Allocation Analysis for Multidistrict Highway Agencies", *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 167–175, 2003.
- [14] P. Chootinan, A. Chen, M. R. Horrocks, and D. Bolling, "A Multi-Year Pavement Maintenance Program Using a Stochastic Simulation-Based Genetic Algorithm Approach", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 40, no. 9, pp. 725–743, 2006.
- [15] J.S. Chou and T.S. Le, "Reliability-Based Performance Simulation for Optimized Pavement Maintenance", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 10, pp. 1402–1410, 2011.
- [16] J. M. de la Garza, S. Akyildiz, D. R. Bish, and D. A. Krueger, "Network-Level Optimization of Pavement Maintenance Renewal Strategies", *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, no. 4, pp. 699–712, 2011.
- [17] J. Farhan and T. Fwa, "Incorporating Priority Preferences into Pavement Maintenance Programming", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, no. 6, pp. 714–722, 2012.
- [18] K. J. Feighan, M. Y. Shahin, K. C. Sinha, and T. D. White, "A Sensitivity Analysis of the Application of Dynamic Programming to Pavement Management Systems", *Transportation Research Record*, no. 1215, pp. 101–114, 1989.
- [19] A. Ferreira, A. Antunes, and L. Picado-Santos, "Probabilistic Segment-linked Pavement Management Optimization Model", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 128, no. 6, pp. 568–577, 2002.
- [20] T. F. Fwa and W. T. Chan, "Priority Rating of Highway Maintenance Needs by Neural Networks", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 119, no. 3, 1993.
- [21] T. Fwa and J. Farhan, "Optimal Multiasset Maintenance Budget Allocation in Highway Asset Management", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, no. 10, pp. 1179–1187, 2012.
- [22] L. Gao and Z. Zhang, "Robust Optimization for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2084, pp. 55–61, 2008.
- [23] L. Gao, C. Xie, Z. Zhang, and S. T. Waller, "Network-Level Road Pavement Maintenance and Rehabilitation Scheduling for Optimal Performance Improvement and Budget Utilization", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 278–287, 2012.
- [24] S. Meneses and A. Ferreira, "Pavement Maintenance Programming Considering Two Objectives: Maintenance Costs and User Costs", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 206–221, 2013.
- [25] D. Moazami, H. Behbahani, and R. Muniandy, "Pavement Rehabilitation and Maintenance Prioritization of Urban Roads Using Fuzzy Logic", *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 10, pp. 12869–12879, 2011.
- [26] M. Ng, Z. Zhang, and S. Travis Waller, "The Price of Uncertainty in Pavement Infrastructure Management Planning: An Integer Programming Approach", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no. 6, pp. 1326–1338, 2011.
- [27] J. B. Odoki and H. R. G. Kerali, *Analytical Framework and Model Descriptions – Volume 4 of Highway Development and Management Series*. Paris, France: International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC, 2006.
- [28] B. B. Reddy and A. Veeragavan, "Priority Ranking Model for Managing Flexible Pavements at Network Level", *Journal of Indian Roads Congress*, 2001.
- [29] Y. U. Shah, S. S. Jain, and M. Parida, "Evaluation of Prioritization Methods for Effective Pavement Maintenance of Urban Roads", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 238–250, 2014.
- [30] K. Tsunokawa, D. Van Hiep, and R. Ul-Islam, "True Optimization of Pavement Maintenance Options with What-If Models", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 193–204, 2006.
- [31] F. Wang, Z. Zhang, and R. Machemehl, "Decision-Making Problem for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects", *Transportation Research Record*, vol. 1853, pp. 21–28, 2003.
- [32] J. Yoo and A. Garcia-Diaz, "Cost-Effective Selection and Multi-Period Scheduling of Pavement Maintenance and Rehabilitation Strategies", *Engineering Optimization*, vol. 40, no. 3, pp. 205–222, 2008.
- [33] A. Chamorro, S. Tighe, and N. Rojas, "Development of Maintenance Standards for Rural Networks Based on Cost-Effectiveness Analysis," *MAIREPAV 7 - The Seventh International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Auckland, New Zealand, 2012.
- [34] G. W. Flintsch and C. Chen, "Soft Computing Applications in Infrastructure Management" *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 157–166, 2004.
- [35] C. Videla and P. Gaete, "Una metodología de Optimización Económica para la Definición de Políticas de Conservación en Pavimentos Asfálticos," *Rutas*, vol. 42, pp. 23–32, 1994.
- [36] M. B. Khurshid, M. Irfan, A. Ahmed, and S. Labi, "Multidimensional Benefit-Cost Evaluation of Asphaltic Concrete Overlays of Rigid Pavements", *Structure and Infrastructure Engineering*, in print, 2013. DOI: 10.1080/15732479.2013.767842
- [37] K. T. Hall, C. E. Correa, and A. L. Simpson, *LTPP Data Analysis: Effectiveness of Maintenance and Rehabilitation Options*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.
- [38] M. B. Khurshid, M. Irfan, and S. Labi, "Comparison of Methods for Evaluating Pavement Interventions: Evaluation and Case Study", *Transportation Research Record*, vol. 2108, pp. 25–36, 2009.
- [39] R. Haas, S. L. Tighe, and L. Cowe Falls, "Determining Return on Long-Life Pavement Investments", *Transportation Research Record*, vol. 1974, pp. 10–17, 2006.
- [40] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [41] J. V. Martí, F. Gonzalez-Vidosa, V. Yepes, and J. Alcalá, "Design of Prestressed Concrete Precast Road Bridges with Hybrid Simulated Annealing", *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 342–352, 2013.
- [42] C. Torres-Machi, E. Pellicer, V. Yepes, and A. Chamorro, "Heuristic Optimization Model for Infrastructure Asset Management", *Advances in Artificial Intelligence*, C. Bielza, A. Salmerón, A. Alonso-Betanzos, J. I. Hidalgo, L. Martínez, A. Troncoso, E. Corchado, and J. M. Corchado, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 300–309.

Referencia del artículo: Torres-Machí, C., Chamorro, A., Yepes, V., and Pellicer, E. (2014). "Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management." *Revista de la Construcción*, 13(2), 49–56.

CURRENT MODELS AND PRACTICES OF ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EVALUATION FOR SUSTAINABLE NETWORK-LEVEL PAVEMENT MANAGEMENT

Cristina Torres-Machí¹; Alondra Chamorro²; Víctor Yepes^{1,3}; Eugenio Pellicer¹

¹ *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València (España), Camino de Vera sn, 46022 Valencia (España). E-mail: critorma@upv.es; pellicer@upv.es*

² *National Research Center for Integrated Natural Disaster Management, Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile), Av. Vicuña Mackenna 4860. Edif. San Agustín Piso 3, Santiago (Chile). E-mail: achamorro@ing.puc.cl*

³ *ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de València (España), Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia (España). E-mail: vyepesp@upv.es*

Resumen

Las infraestructuras de transporte terrestre y particularmente la infraestructura vial son fundamentales en el desarrollo económico y social. El nivel de calidad percibido por el usuario viene determinado, principalmente, por el pavimento. A nivel mundial se invierte anualmente más de 400 mil millones de dólares en la construcción y el mantenimiento de pavimentos; tareas que aumentan en un 10% el impacto ambiental generado por la circulación de los vehículos. Surge así la necesidad de incorporar un enfoque sostenible en la evaluación de alternativas de conservación que considere aspectos técnicos, económicos, medioambientales, políticos e institucionales de forma integrada y armónica a lo largo de su ciclo de vida. La presente investigación tiene por objeto estudiar los modelos y prácticas en la evaluación económica y ambiental de pavimentos para analizar las ventajas y las limitaciones de la práctica actual e identificar oportunidades para mejorar su gestión sostenible. Una de las principales limitaciones identificadas es la escasez de modelos que consideren de forma integrada los aspectos económicos y ambientales. Se detecta la necesidad de modelos que consideren el efecto sobre los usuarios en zonas de trabajo así como el uso de nuevas tecnologías y materiales reciclados más respetuosos con el medio ambiente.

Abstract

Ground transportation infrastructures, particularly road infrastructure, are essential for economic and social development. The quality level that the user perceives is mainly determined by the pavement condition. More than 400 billion dollars are invested globally each year in pavement construction and maintenance; these tasks increase by 10% the environmental impact generated by vehicle operation. Therefore, a sustainable approach should be incorporated in the assessment of preservation alternatives that consider technical, economic, environmental, political and institutional aspects in an integrated manner over their life-cycle. The purpose of the present research is to examine the models and practices for the economic and environmental evaluation of pavement assets, in order to analyze the advantages and limitations of the current state of the practice and identify the opportunities to improve their sustainable management. One of the main limitations identified is the lack of models that consider the economic and environmental aspects

integrally. A need for models which consider the impact on users in work zones, as well as the use of new technologies and recycled materials that are more respectful of the environment, has been detected.

Keywords: Life-Cycle Assessment (LCA), Asset Management, Pavement, Sustainability.

1 Introduction

Transportation infrastructures are an important part of a country's assets; in addition, they are a key factor to achieve economic development, productivity improvement and social wellbeing (Uddin et al., 2013). Recent reports highlight its economic relevance; thus, more than 400 billion dollars are invested every year in the world in pavement construction and maintenance (IRF, 2010). From the environmental point of view, in the last years there has been an increased effort for the reduction and reuse of residues generated by the construction industry (Aldana & Serpell, 2012). As for road infrastructures, the biggest efforts have been focused on reducing vehicle emissions, at the expense of the impact generated in the stages of construction, use and maintenance. According to some studies, this impact increases by 10% the impact generated by vehicle operation (Chester & Horvath, 2009). This situation leads, inexorably, to a sustainable management of pavements, which deals with technical, economic, environmental, political and institutional criteria over their life-cycle. This view goes beyond the actions' immediate effect on these infrastructures (Chamorro, 2012; Chamorro & Tighe, 2009; SADC, 2003).

Pavement Management Systems (PMS) were introduced in the 20th century during the sixties, in order to facilitate the preservation of pavement infrastructures. These systems transform the available data into useful information to help with the decision-making process in a structured way. The PMS can act at three different levels: (1) project-level management, where technical decisions are made concerning the design, construction and preservation of a specific pavement; (2) network-level management, which analyses a group of pavements in order to rank and schedule the works for their preservation under budget constraints; and (3) strategic-level management, which establishes general management objectives, preservation policies and the available resources. The management level has an impact on the time horizon of the analysis, the space coverage, and the detail of the data needed for the decision-making process (Solminihac, 2001; Uddin et al., 2013).

2 Objective, Scope and Method of the Study

The aim of this paper is to review the existing analyses, indicators and models for the economic and environmental evaluation applied to pavement management; present the advantages and limitations of the current state of the practice and identify opportunities to improve its sustainable management. The scope of the study is limited to a network-level management, which evaluates first a set of alternatives and then optimizes and prioritizes available resources. The study is focused on the economic and environmental evaluation for the sustainable management of pavement infrastructure networks. Meanwhile, the optimization and/or prioritization methods have already been reviewed by the authors (Torres-Machí et al., 2014a).

In order to fulfill the described objectives, the study revised first the types of analyses, indicators and models used for the economic and environmental evaluation in the pavement network management; and second, it

analyzed the advantages and limitations of the current state of the practice, identifying the improvement opportunities in the sustainable management of these networks.

3 Analyses and Indicators for the Economic and Environmental Evaluation of Pavements

3.1 Economic Evaluation

Pavement economic evaluation can be performed by means of the following types of analyses (FHWA, 2003):

- Life-Cycle Cost Analysis (LCCA): Compares different investment alternatives based on their cost flows over the life-cycle.
- Cost-Benefit Analysis (CBA): Identifies the net benefit of an investment by comparing its present and future costs and benefits. The CBA considers that the selection of a project is justified if the value of the benefits exceeds that of the costs.
- Cost-Effectiveness Analysis (CEA): Considers the costs with their present value and evaluates the benefits through an indicator measuring the investment's effectiveness. Thus, the CEA allows comparing alternatives which generate responses that are difficult to monetize.
- Economic Impact Analysis (EIA): Evaluates the effects on the local, regional or domestic economy by quantifying, among others, the effect on the economic activity, employment, immigration, tourism, etc.
- Financial Analysis (FA): Studies the financing needs of the project over its service life, considering the mismatch between expenditures and available resources.

The economic evaluation of the different investment alternatives can be made through a series of indicators presented in Table 1, depending on the type of economic analysis and the aspects considered in it.

Table 1. Types of economic analyses and applicable indicators. Source: Self Elaboration, 2013.

Indicator	Type of Economic Analysis				
	LCCA	CBA	CEA	EIA	FA
<i>Net Present Value</i>	x	x	x	x	x
<i>Equivalent Annual Cost</i>	x	x		x	x
<i>Internal Rate of Return</i>		x			x
<i>Cost-Benefit Ratio</i>		x			
<i>Cost-Effectiveness Ratio</i>			x		
<i>Investment Return Period</i>		x			x

Where, LCCA is Life-Cycle Cost Analysis; CBA is Cost-Benefit-Analysis; CEA is Cost-Effectiveness Analysis; EIA is Economic Impact Analysis; FA is Financial Analysis.

Net Present Value (NPV)

The NPV updates the benefits and costs over the analysis period through the discount rate. If it considers the costs only, it is denominated net present value in terms of the cost. The main advantage of the NPV is that the costs and benefits are expressed by a single value, although it requires for the benefits to be monetized. Another advantage is its popularity, since it is the most widespread indicator when assessing projects with public investment (Haas et al., 1994).

Equivalent Annual Cost (EAC)

This method combines all initial and future capital costs and expresses them as a constant annual cost over the analysis period. It is a simple, easy to understand indicator, which is especially useful for annual budgets (Walls & Smith, 1998). Monetization is necessary if it includes benefits..

Internal Rate of Return (IRR)

The internal rate of return determines the discount rate that equals a project's costs and benefits. The most profitable alternative is that with the highest IRR. This indicator helps evaluating the return of private investments (Walls & Smith, 1998). However, as it is expressed as a percentage, it does not quantify the total investment amounts; therefore, it generally includes other indicators such as the NPV. Moreover, the method does not consider the benefits that are not monetized.

Cost-Benefit Ratio (CBR)

CBR represents the ratio between the difference of benefits and present costs; the alternatives with a value higher than the unit are considered profitable. CBR is one of the most widespread methods for project economic evaluation (Browne & Ryan, 2011). Its main advantage, and also its limitation, is that it monetizes the assessed benefits. However, like the IRR, the CBR does not provide information about the total amounts of costs or benefits.

Cost-Effectiveness Ratio (CER)

This indicator represents the ratio between the effectiveness of an alternative and its present costs. It evaluates how a specific alternative improves the infrastructure condition and delays the deterioration process (Khurshid et al., 2009). Although different condition indexes can be used for pavement management (Osorio et al., 2014; Chamorro et al., 2010; Chamorro et al., 2009; Chamorro & Tighe, 2009), the purpose of this indicator is to evaluate if the infrastructure fulfills the needs for which it was built (Uddin et al., 2013).

Pavement deterioration models, expressed by their performance curve, show the evolution of the condition index and the effect of the maintenance activities over time (Chamorro & Tighe, 2011; Haas et al., 2006; Vera et al., 2010). The performance curve assesses the effectiveness of an alternative by measuring the area bounded by the performance curve and a minimum performance indicator (ABPC) (Fig 2), weighted by factors such as traffic or section length (Eq. 1).

$$Effectiveness = ABPC \cdot L \cdot AADT \quad Eq. (1)$$

Where,

ABPC = Area bounded by the performance curve and a threshold value of minimum performance indicator (PI_{min}) (Fig 2).

L = Section length.

AADT = Annual average daily traffic.

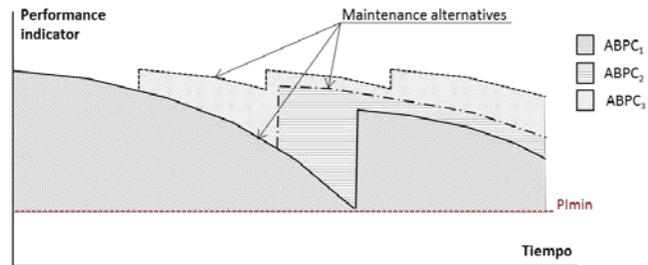


Fig 2. The area bounded by the performance curve and a minimum performance indicator (ABPC) is an indicator of the effectiveness of a maintenance alternative. Source: Self Elaboration based on Haas et al., 1994.

ABPC is a good indicator, since proper maintenance increases its value, thus generating greater benefits for the user. The authors have used this indicator to optimize the problem of allocating resources at the network level (Torres-Machi et al., 2013, 2014b). Its main advantage is that it allows including benefits that are difficult to monetize, such as accident reduction, travel time and vehicle operating costs, among others (Khurshid et al., 2009; Chamorro, 2012).

Investment Return Period (IRP)

This indicator evaluates the time needed to recover a project's capital investment, that is, when the updated benefits equal or exceed the updated costs (Hall et al., 2003). The IRP has similar advantages and limitations as the IRR. It is generally used when assessing the rate of return of private investments and it usually complements other indicators like the NPV.

3.2 Environmental Evaluation

The environmental evaluation for pavement management can be analyzed with the help of ISO 14040 standards "Environmental Management" (ISO, 2006) or sustainability certification systems.

Analysis based on ISO 14040 standards

Life-cycle assessment (LCA) is a methodology that evaluates a product's environmental impact, from the purchase of raw materials to the production, use, final treatment, recycling, until its final disposal. The indicators used in the evaluations based on the ISO 14040 collect data from emissions and consumption of materials and energy (for example, water consumption, CO₂ emissions or NO_x emissions). This evaluation is applied by models such as PaLATE, Changer and ROAD-RES, among others, which are reviewed in the following section.

Environmental Certification Systems

These systems are based on the environmental certification of buildings, specifically on the LEED certification system (*Leadership in Energy and Environmental Design*), created by the U.S. Green Building Council in 1998. The building projects are rated according to different levels covering issues such as energy efficiency, use of alternative energies, improvement of indoor environmental quality, and others (Owensby-Conte & Yepes,

2012; Ramírez & Serpell, 2012). Concerning pavements, the indicator is a point-based rating system associated to a certification level similar to the one used in LEED (certified, silver, gold or platinum).

4 Models for the Economic and Environmental Evaluation of Pavements

4.1 Models for Economic Evaluation

Models that evaluate pavements in economic terms can be classified according to the costs and/or benefits, the indicator and the type of analysis considered. First, this section presents a description of the used costs and benefits and, second, the indicators and the analysis used in the models.

Costs and Benefits in the Economic Evaluation

The costs and benefits considered in the economic evaluation of pavements are classified in the following groups:

- Agency costs: Includes the costs that are necessary to put the infrastructure into service, as well as those associated to maintenance activities and mitigation.
- Effect on users: These effects are calculated by integrating three concepts: accidents, travel time (TT) and vehicle operating costs (VOC), the latter associated to fuel consumption, and wear of tires and other vehicle parts. A distinction is made between the effects generated during
 - normal operation and those derived from work zones. The first correspond to the effects on users during periods when there are no operations that reduce the infrastructure's capacity. The second ones refer to the costs generated when circulating through a section where circulation has been modified due to maintenance or construction operations.
- Externalities: It refers to an action's direct impact on non-users (FHWA, 2003). They include effects such as air pollution, noises, adverse effects on the water quality, etc. The assessment of these externalities is difficult to monetize (FHWA, 2003; Khurshid et al., 2009). Although there are studies aimed at improving the quantification of these effects (Browne & Ryan, 2011; Cross et al., 2011), the usual practice is to exclude them from the economic evaluation, and to consider them in the decision making process through additional indicators.

From the above analysis it can be concluded that the concepts to be included in the economic evaluation depend on the type of analysis (Table 2). Thus, for example, the effect on users during normal operation is considered in the cost-benefit analysis (CBA) and in the cost-effectiveness analysis (CEA), but it is not included in the LCCA, because here the alternatives have similar service levels.

Table 2. Costs and benefits included in the different types of economic analyses. Source: Self Elaboration, 2013.

	LCCA	CBA	CEA
Agency costs			
Design & Engineering	✓	✓	✓
Land Purchase	✓	✓	✓
Construction	✓	✓	✓
Reconstruction & Rehabilitation	✓	✓	✓
Preservation	✓	✓	✓
Mitigation		✓	✓
Effect on users in work zones			
Accidents	✓	✓	✓
Travel Time (TT _{work zones})	✓	✓	✓
Vehicle Operating Cost (VOC _{work zones})	✓	✓	✓
Effect on users during normal operation			
Accidents		✓	✓
Travel Time (TT _{normal})		✓	✓
Vehicle Operating Cost (COV _{normal})		✓	✓
Externalities (non- users)			
Emissions		✓	✓
Noises		✓	✓
Other Impacts		✓	✓

Models for the Economic Evaluation of Pavement Preservation Activities

A number of existing economic evaluation models are described below:

- The HDM-4 (*Highway Development and Management*) is a system for pavement management in interurban roads, which allows the economic evaluation of maintenance, construction of new roads and improvement of existing roads, among others (Odoki & Kerali, 2006).
- The HERS-ST model (*Highway Economic Requirements System-State Version*), developed by the Federal Highway Administration, evaluates the improvements resulting from rehabilitation and reconstruction operations, excluding preservation treatments (FHWA, 2002).
- The MicroPaver management system, proposed by the US Defense Department for pavement preservation, uses the cost-effectiveness analysis with the PCI index (*Pavement Condition Index*) as condition indicator (Colorado State University, 2013).
- The Pavement View Plus system (Cartegraph, 2013) bases the economic evaluation on a cost-effectiveness analysis considering the OCI condition indicator (*Overall Condition Index*).
- The RealCost model, developed in the USA by the Federal Highway Administration, is based on the procedure taken from Walls and Smith (1998), which calculates the effect on users during normal

operation and in work zones. However, the model is conceived only to evaluate pavement design alternatives, since it does not include preservation tasks.

- The MicroBENCOST model evaluates the users' cost and benefits, embracing seven types of projects: capacity increase, bypass construction, intersection improvements, pavement rehabilitation, bridge improvements, safety improvements, and improvements in railway crossings (Mcfarland et al., 1993). Therefore, it does not assess preservation operations.

In view of these facts, Table 3 was elaborated to compare the analyses and concepts considered in current economic evaluation models. The table shows that all models include benefit evaluation in their economic analyses, although there is no consensus in the type of analysis employed. As for the economic costs and benefits, it shows that several models do not include user costs (VOC, TT and accidents) nor externalities.

Table 3. Analyses and concepts considered in current economic evaluation models. Source: Self Elaboration, 2013.

Economic Evaluation Model	Analysis		Costs & Benefits Considered				
	ACB	ACE	Agency	TT y COV	Acc.	WZ	Ext
<i>HDM-4</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓
<i>HERS-ST</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓
<i>MicroPaver</i>		✓	✓				
<i>Pavement View Plus</i>		✓	✓				
<i>RealCost</i>	✓		✓	✓		✓	
<i>Microbencost</i>	✓		✓	✓	✓		

Where, TT is Travel Time; VOC is Vehicle Operating Cost; Acc. is Accidents; WZ is the effect on users in work zones; Ext. is Externalities.

The RealCost model is the only one that includes the effect on users in work zones. Nevertheless, this model has been designed to evaluate pavement project alternatives and, therefore, it is not adequate for network-level management. The same limitation is observed in the models specifically developed to evaluate the work zone effect, such as QUEWZ-98 or CA4PRS (*Construction Analysis of Pavement Rehabilitation Strategies*) (Mallela & Sadasivam, 2011).

4.2 Models for the Environmental Evaluation

This section reviews the LCA models based on the ISO 14040 standard, followed by environmental certification models.

LCA models based on the ISO 14040 standard

- The HDM-4 system evaluates the emissions, noise and energy balance. Only the energy balance assessment considers the construction, maintenance and rehabilitation stages, in addition to vehicle circulation. The energy evaluation does not detail each process, but uses aggregate data and thus assigns each treatment an average energy consumption by unit of used material (Bennett & Greenwood, 2004).
- The PaLATE model (*Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*) was developed in 2003 by the University of California, Berkeley, to assess pavement projects in economic and

environmental terms. This model evaluates the environmental impact of materials and processes used in a project, considering the design, construction and maintenance stages (Nathman, 2008; Nathman et al., 2009).

- The Changer model (*Calculator for Harmonized Assessment and Normalization of Greenhouse-gas Emissions for Roads*) was created by the International Road Federation (IRF) to calculate carbon dioxide equivalent emissions caused by pavement construction and maintenance activities (Huang et al., 2013).
- The British model for asphalt pavement assessment, proposed by the Newcastle University, considers the construction and maintenance stage and includes the work zone effect (Huang et al., 2009a; Huang et al., 2009b).
- The ROAD-RES model, proposed by the Technical University of Denmark, is focused on the use of incineration residues, and allows comparing solutions that use virgin and recycled materials (Birgisdóttir, 2005).
- The Caltrans B/C model was developed by the California Department of Transportation for a cost-benefit assessment that would include environmental effects (Booz-Allen & Hamilton Inc., 1999). Emissions are calculated based on speed and traffic volume and the cost is estimated according to a study developed by Delucchi (1997).

Environmental Certification Models

The main environmental certification models applied to pavement projects are described below:

- The CEEQUAL model “*Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Award Scheme*” was developed by the UK Institution of Civil Engineers to assess projects (Willettts et al., 2010) considering aspects such as the use of materials, energy and coal consumption, waste management, etc. A total of 2000 points are distributed among the 12 aspects considered.
- The GreenRoads model, proposed by the University of Washington and Ch2M Hill (Muench et al., 2010), is a certification system based on environmental credits which are applied to new and maintenance highway projects. It considers, among others, the use of materials and resources, environment and water, access and equity, and pavement technologies.
- The GreenLITES model “*Green Leadership in Transportation Environmental Sustainability*”, of the New York State Department of Transportation, is used in the certification of highway design, operation and maintenance projects (NYSDOT, 2013). Its principles are based on GreenRoads’ certification and LEED buildings’ certification and considers criteria such as the use of recycled materials, use of sustainable products in the machinery, and renovation of shoulders for the safety of pedestrians and cyclists.
- The GreenPave model, developed by the Ministry of Transportation of Ontario (Canada) to evaluate concrete and asphalt pavements, is based on LEED, GreenRoads and GreenLITES certification systems, adapted to the practices used in Ontario (MTO, 2010; Chan et al., 2012). The aim is to strengthen the design and selection of sustainable maintenance alternatives by assessing pavement design technologies, materials and resources, energy and atmosphere, and innovation and design process.
- The BE2ST-in-Highways model “*Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation-Infrastructure-Highways*” has been developed by the University of Wisconsin (Madison) and the Recycling Materials Resource Center (RMRC, 2013). It includes nine categories: energy use, global warming potential, recycling in situ, total recycling, water consumption, life-cycle costs, traffic noise and residues. The main novelty is that it uses quantitative tools to evaluate each category, PaLATE for the environmental assessment and RealCost for the economic evaluation.

5 Discussion

This section analyses the advantages and limitations of the economic and environmental evaluation of pavements.

5.1 Economic Evaluation

When reviewing the state of the practice, the study shows that economic models take into account the cost-benefit or cost-effectiveness analyses in all cases (Table 3). The LCCA is usually not applied, because it is limited to the study of alternatives with similar benefits (and consequently, levels of service). Moreover, the financial and economic impact analyses have different objectives than those mentioned above, and therefore, they are generally developed in a parallel and independent way. In relation to the models used, the cost-benefit analysis has the limitation of monetizing certain aspects like the social costs. This limitation is not present in the CEA, since it compares the benefits of different alternatives without an economic assessment; however, it requires an objective methodology to define the benefit-condition ratio through, for example, performance models.

In relation to the economic evaluation models, limitations are detected in the consideration of the effects on users. Traditionally, administrations do not evaluate these effects due to the uncertainty associated to calculation and the penalty represented by these costs, which do not impact the budgets directly (FHWA, 2003). Nevertheless, these costs can have more relevance than the administration costs (Delwar & Papagiannakis, 2001; Labi & Sinha, 2003), and so they should be included in the evaluation. Concerning the effects during normal circulation, the complexity of its economic quantification can be avoided through the cost-effectiveness analysis. Furthermore, only the RealCost model includes the effects in work zones in its evaluations (Table 3). However, this method is intended to assess project alternatives; therefore, it does not allow evaluating preservation alternatives and requires data with a high level of detail, and as a result, an evaluation at network level is not viable. Thus, the need to develop a model that evaluates the effect on users in work zones in a network-level management is detected. The execution time of the different preservation options could be used as an indicator, since faster execution alternatives will generate less effect on users.

5.2 Environmental Evaluation

Three key factors are detected when assessing the suitability of an environmental evaluation model:

- Data availability and reliability: this factor is especially relevant in the assessments based on LCA, because these methods require more information, and evaluations are performed with a higher level of detail.
- Transparency and clarity of the evaluations: the evaluation method must provide an objective and transparent assessment concerning the environmental impact.
- Concepts or criteria to be included in the evaluation: they have to consider the specific needs of the evaluation place. Thus, for example, there are models with similar evaluation methodologies which include the peculiarities of different localizations (for example, GreenPave from Ontario versus GreenLITE from New York).

If reliable data are available, LCA models provide more precise evaluations than the environmental certification models, whose variations are usually not based on performance indicators (RMRC, 2013). Therefore, certification models tend to be less transparent than those based on the LCA, thus being subject to more subjective evaluations. However, the assessments obtained by means of certification methods are

more intuitive than LCA evaluations, thus being more attractive to convey the benefits of sustainable initiatives to less specialized agents. Therefore, the use of certification models is beneficial for a greater dissemination and understanding of the environmental evaluation, but it should be supported with objective indicators obtained from LCA models. Table 4 shows the main advantages and inconveniences of LCA models.

Table 4. Advantages and limitations of LCA models. Source: Self Elaboration, 2013

Model	Advantages	Limitations
HDM-4	Evaluates impact with aggregate data.	It evaluates only the energy consumption of preservation activities. It does not allow to consider the use of recycled materials or new technologies.
PaLATE	Open data and calculation Considers recycled materials.	Needs data upgrade (obtained in 1992).
CHANGER	Evaluates impact on carbon dioxide equivalent emissions.	It fails to consider preservation activities. It ignores the effect of recycling tasks.
British Model	Considers use of recycled materials.	Limited to asphalt pavements.
Road-Res	Considers use of incineration residues.	Limited to the use of incineration residues.
Caltrans B/C	Economic assessment of emissions.	It does not evaluate maintenance activities. Monetary evaluation does not consider current improvements in reduction of vehicle emissions.

5.3 Integrated Economic-Environmental Evaluation

After reviewing the analyses, indicators and models used in the economic and environmental evaluation concerning pavement management, a lack of models that envisage the economic and environmental aspects integrally was detected. As it was indicated in the introduction, the integrated consideration of both concepts over the life-cycle is essential to guarantee its sustainable management. In fact, only two of the models revised (HDM-4 and PaLATE) incorporate economic-environmental analyses in the evaluation of alternatives. However, the HDM-4 does not include the use of recycled materials and new technologies in its environmental evaluation. On the other hand, the PaLATE does not include the effect on users in the economic evaluation.

In view of this situation, it is deemed necessary to develop a model that allows considering the economic and environmental aspects integrally in the allocation of available resources aimed at pavement management and which considers the effect on users both during normal operation and in work zones.

6 Conclusions

Following a review of the current models and practices of economic and environmental evaluations for sustainable network-level pavement management, the following conclusions can be drawn:

- Sustainable pavement management requires the integrated consideration of technical, economic, environmental and social aspects over the life-cycle.
- The economic evaluation applied to pavement management needs the assessment of benefits that are difficult to monetize.

- The effects on direct users during normal operation can be evaluated with no need for a monetary quantification from the area below the performance curve. This indicator assesses alternatives considering both technical and economic criteria.
- The current models of economic evaluation fail to consider the effect on users in work-zones at the network management level, since they require data with a high level of detail which is typical of project-level analyses.
- Two types of analyses are detected for the environmental evaluation of pavements: one based on the ISO 14040 standard and the environmental certification. The first provides a more precise evaluation, but requires a large number of data. The second, more intuitive and easy to assimilate by less specialized agents, is not based on performance indicators, so it can introduce subjective assessments in the evaluation.
- Only two of the reviewed models, HDM-4 and PaLATE, incorporate economic-environmental analyses in the evaluation of alternatives. However, the HDM-4 does not evaluate the use of recycled materials or new technologies, while PaLATE fails to consider the effect on users in the economic evaluation.

The limitations of the models and current state of the practice allow identifying future lines of work:

- In relation to the economic evaluation models, it is necessary to develop a model which considers the effect on users in work zones for a network-level management.
- Regarding the environmental evaluation models, the use of certification models is proposed, which facilitate the dissemination and understanding of the environmental evaluation based on objective indicators obtained from LCA models.
- Finally, the development of models considering economic and environmental criteria integrally is required.

7 Acknowledgments

Authors gratefully acknowledge members of the research group at the Pontificia Universidad Católica de Chile for their resources during the study. The research team acknowledges Fondef/Conicyt 2009 for funding the project “Research and Development of Solutions for Urban Pavement Management in Chile” (D0911018) and the National Research Center for Integrated Natural Disaster Management CONICYT/FONDAP/15110017. Funding over Conicyt (CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2013-63130138) to support this work is sincerely appreciated.

8 References

- Aldana, J., & Serpell, A. (2012). Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un meta-análisis. *Revista de la Construcción*, 11(2), 4–16.
- Bennett, C. R., & Greenwood, I. D. (2004). Modelling road users and environmental effects in HDM-4. Volume 7 of Highway Development and Management Series. Paris: International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC.
- Birgisdóttir, H. (2005). Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration, PhD Thesis, Technical University of Denmark.
- Booz-Allen & Hamilton Inc. (1999). California Life-Cycle Benefit/Cost Analysis Model (Cal-B/C) (http://www.dot.ca.gov/hq/tpp/offices/eab/benefit_files/tech_supp.pdf) [visited 01.04.13]
- Browne, D., & Ryan, L. (2011). Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3), 226–233.
- Cartegraph. (2013). The Operations Management System. (<http://www.cartegraph.com>). [visited 05.08.13]

- Chamorro, A. (2012). Development of a Sustainable Management System for Rural Road Networks in Developing Countries, PhD Thesis, University of Waterloo, Canada.
- Chamorro, A., de Solminihaç, H., Salgado, M., & Barrera, E. (2009). Development and Validation of a Method to Evaluate Unpaved Road Condition with Objective Distress Measures. *Transportation Research Record*, 2101, 3–9.
- Chamorro, A., & Tighe, S. (2009). Development of a Management Framework for Rural Roads in Developing Countries. *Transportation Research Record*, 2093, 99–107.
- Chamorro, A., & Tighe, S. (2011). Condition performance models for network-level management of unpaved roads. *Transportation Research Record*, 2204, 21–28.
- Chamorro, A., Tighe, S. L., Li, N., & Kazmierowski, T. J. (2009). Development of distress guidelines and condition rating to improve network management in Ontario, Canada. *Transportation Research Record*, 2093, 128–135.
- Chan, S., Bennett, B., Lane, B., & Kazmierowski, T. (2012). GreenPave: Ontario's Pavement Sustainability Rating System. TAC Conference and Exhibition, Fredericton, Canada.
- Chester, M. V., & Horvath, A. (2009). Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2).
- Colorado State University. (2013). PAVER - Pavement Management Software. (<http://www.paver.colostate.edu/>) [visited 19.08.13]
- Cross, S. A., Chesner, W. H., Justus, H. G., & Kearney, E. R. (2011). Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options. *Transportation Research Record*, 2227, 43–52.
- Delucchi, M. A. (1997). *The Annualized Social Cost of Motor-Vehicle Use in the U.S., 1990-1991: Summary of Theory, Data, Methods, and Results*. Davis, California, USA: University of California.
- Delwar, M., & Papagiannakis, A. T. (2001). Relative Importance of User and Agency Costs in Pavement LCCA. Fifth International Conference on Managing Pavements, Washington, USA.
- FHWA. (2002). HERS-ST 2.0 Highway Economic Requirements System-State Version. Washington DC, USA: Federal Highway Administration.
- FHWA. (2003). *Economic Analysis Primer*. Washington, D.C. USA: Department of Transportation, FHWA, Office of Asset Management.
- Haas, R., Tighe, S. L., & Cowe Falls, L. (2006). Determining return on long-life pavement investments. *Transportation Research Record*, 1974, 10–17.
- Haas, R. C. G., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. P. (1994). *Modern Pavement Management*. Florida, USA: Krieger Pub Co.
- Hall, K., Correa, C., Carpenter, S., & Elliott, R. (2003). Guidelines for Life-Cycle Cost Analysis of Pavement Rehabilitation Strategies. 82st Transportation Research Board Annual Conference. Washington, DC, USA.
- Huang, Y., Bird, R., & Bell, M. (2009). A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 197–204.
- Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283–296.
- Huang, Yue, Hakim, B., & Zammataro, S. (2013). Measuring the carbon footprint of road construction using CHANGER. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 590–600.
- International Standard Organisation (ISO). (2006). *Environmental Management-Life Cycle Assessment: Principles and Framework*, Geneva: International Standard Organisation.
- IRF (International Road Federation) (2010). *IRF World Road Statistics 2010*. Geneva: International Road Federation.
- Khurshid, M. B., Irfan, M., & Labi, S. (2009). Comparison of methods for evaluating pavement interventions: Evaluation and case study. *Transportation Research Record*, 2108, 25–36.
- Labi, S., & Sinha, K. (2003). *The effectiveness of maintenance and its impact on capital expenditures*. Indiana, USA: Joint Transportation Research Program, Indiana. Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Mallela, J., & Sadasivam, S. (2011). *Work zone road user costs*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Mcfarland, W. F., Memmott, J. L., & Chui, M. K. (1993). *Microcomputer evaluation of highway user benefits (No. Project No. 712)*. Texas, USA: National Cooperative Highway Research Program.
- MTO (Ministry of Transportation - Ontario)(2010). *GreenPave: Ontario's First Pavement Sustainability Rating System*. Road Talk – Ontario's Transportation Technology Transfer Digest, 16(1).

- Muench, S. T., Anderson, J. L., & Söderlund, M. (2010). Greenroads: A sustainability performance metric for roadways. *Journal of Green Building*, 5(2), 114–128.
- Nathman, R. (2008). PaLATE user guide, example exercise and contextual discussion. Tesis MSc University of Delaware, USA.
- 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.
- NYS DOT. (2013). GreenLITES: Recognizing Leadership in Transportation Environmental Sustainability. (<https://www.dot.ny.gov/programs/greenlites/>) [visited 15.08.13]
- Odoki, J. B., & Kerali, H. R. G. (2006). Analytical Framework and Model Descriptions – Volume 4 of Highway Development and Management Series. Paris: International Study of Highway Development and Management (ISOHDM), World Road Association PIARC.
- Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S. L., & Videla, C. (2013). Calibration and validation of a condition indicator for managing urban pavement networks. *Transportation Research Board 93st Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- Owensby-Conte, D., & Yepes, V. (2012). Green Building: Analysis of State of Knowledge. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 1(3), 27–32.
- Ramírez, V., & Serpell, A. (2012). Certificación de la calidad de viviendas en Chile: Análisis comparativo con sistemas internacionales. *Revista de la construcción*, 11(1), 134–144.
- RMRC. (2013). BE2ST-in-Highways | Recycled Materials Resource Center. (<http://rmrc.wisc.edu/be2st-in-highways/>) [visited 15.04.13]
- SADC. (2003). Low-volume Sealed Roads Guidelines. Gaborone, Botswana: Southern African Development Community.
- Solminihac, H. (2001). Gestión de infraestructura vial. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica De Chile.
- Torres-Machi, C., Pellicer, E., Yepes, V., & Chamorro, A. (2013). Heuristic Optimization Model for Infrastructure Asset Management. In C. Bielza, A. Salmerón, A. Alonso-Betanzos, J. I. Hidalgo, L. Martínez, A. Troncoso, J. M. Corchado (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence* (pp. 300–309). Springer Berlin Heidelberg.
- Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., & Yepes, V. (2014a). An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level. *The Scientific World Journal*, 2014, Article ID 524329. doi:10.1155/2014/524329
- Torres-Machí, C., Yepes, V., Pellicer, E., & Chamorro, A. (2014b). Application of simple and hybrid local search heuristics for the long-term optimization of pavement maintenance strategies at the network level (Vol. 14–2247, pp. 1–11). *Transportation Research Board 93st Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- Uddin, W., Hudson, R. C. G., & Haas, R. C. G. (2013). *Public infrastructure asset management*. New York: McGraw-Hill Education.
- Vera, I., Thenoux, G., Solminihac, H. D., & Echaveguren, T. (2010). Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 9(2), 76–88.
- Walls, J., & Smith, M. R. (1998). Life-cycle cost analysis in pavement design: in search of better investment decisions. (No. Publication No. FHWA-SA-98-079). Washington, DC, USA: FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Willetts, R., Burdon, J., Glass, J., & Frost, M. (2010). Environmental and sustainability impact assessment of infrastructure in the United Kingdom. *Transportation Research Record*, 2158, 143–150.