



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**DESARROLLO DE UN MÉTODO DE VALORIZACIÓN PARA EL ACTIVO  
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS, COMPATIBLE CON EL NIVEL DE SERVICIO  
A USUARIOS, APLICABLE A CARRETERAS INTERURBANAS  
CONCESIONADAS**

**IXA ALEXANDRA MARZAL DÍAZ**

**Ingeniero Civil**

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Septiembre de 2021





**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**DESARROLLO DE UN MÉTODO DE VALORIZACIÓN PARA EL ACTIVO  
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS, COMPATIBLE CON EL NIVEL DE SERVICIO  
A USUARIOS, APLICABLE A CARRETERAS INTERURBANAS  
CONCESIONADAS**

Memoria de Título y Tesis de Grado presentada por  
**IXA ALEXANDRA MARZAL DÍAZ**

Como requisito parcial para optar al título de  
**Ingeniero Civil**  
y al grado de  
**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
**Rodrigo Andrés Delgadillo Sturla**

Septiembre de 2021



TÍTULO DE LA TESIS

**DESARROLLO DE UN MÉTODO DE VALORIZACIÓN PARA EL ACTIVO PAVIMENTOS ASFÁLTICOS, COMPATIBLE CON EL NIVEL DE SERVICIO A USUARIOS, APLICABLE A CARRETERAS INTERURBANAS CONCESIONADAS**

AUTOR

**IXA ALEXANDRA MARZAL DÍAZ**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Rodrigo Delgadillo Sturla \_\_\_\_\_

Alelí Osorio Lird \_\_\_\_\_

Tomás Echaveguren Navarro \_\_\_\_\_

Valparaíso, Chile, septiembre de 2021.



# Agradecimientos

Gracias a Dios. Por bendecir mi vida, guiar mis pasos y ser el sustento de cada día.

Un especial agradecimiento a mi familia. A mis padres, abuela, tíos, tías y primos, a Franco y a Marina, por apoyarme durante tantos años y alentarme a no bajar nunca los brazos. Gracias por soportar las jornadas infinitas de trabajo y celebrar cada uno de los logros que conseguí. No lo hubiera hecho sin ustedes. Los quiero y agradezco a Dios por la familia que tengo.

A mi amigos, que acompañaron mis años en la universidad de la forma más grata posible. Recuerdo las jornadas de estudio y trabajo grupal que se hicieron mucho más amenas junto a ustedes. Llevo en mi mente y corazón cada momento que compartimos y que convirtieron mi estadía en la USM en una de las mejores experiencias de mi vida. Gracias también a los que sin ser compañeros de carrera, compartieron sus días y sus amistades conmigo.

Gracias a los profesores que me guiaron en este camino. En primer lugar, a mi profesor guía, Rodrigo Delgadillo, por embarcarse en este viaje conmigo y creer en mis capacidades; por su buena voluntad y compromiso con cada parte de este trabajo. En segundo lugar, a la profesora Alelí Osorio, por ser un ejemplo a seguir, por su amabilidad y sus buenos consejos. A los profesores Carlos Wahr, Tomás Echaveguren y Felipe Araya por su apoyo en el desarrollo de esta tesis. A ellos y a todos los profesores que me entregaron los conocimientos y herramientas para formarme como profesional y persona durante mi paso por la USM, muchas gracias.

*“Es el supremo arte del maestro despertar la curiosidad en la expresión creativa y conocimiento” (A.E).*

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile, a través de su programa FONDEF, Concurso IDeA I+D 2020, código de proyecto ID20I10072, “Metodología de Valorización del Patrimonio Vial Compatible con el Nivel de Servicio a los Usuarios”.

Finalmente, agradecer a la Dirección General de Investigación, Innovación y Postgrado de la Universidad Técnica Federico Santa María por el apoyo a través de la beca de arancel y financiera que hizo posible el desarrollo de esta tesis.



# Dedicatoria

*A mis papás, María Consuelo y Miguel, por darme la vida y el apoyo todos estos años.*

*También a quienes no alcanzaron a ver estos frutos, mi bisabuela y mi tata Pablo.*



# Resumen

El concepto tradicional de la gestión de infraestructura vial se basa en la conservación de las obras, pero desde los últimos años ha emigrado hacia el cumplimiento de objetivos estratégicos. Para el objetivo estratégico de preservación del patrimonio vial, la valoración de los activos viales se ha transformado en una de las metas más importantes, siendo una actividad que se realiza tanto en Chile como en el extranjero y es indispensable para el desarrollo económico y social de los países. La valoración de activos es una herramienta eficaz para lograr el equilibrio entre costos, riesgos y desempeño en la gestión.

El sistema de concesiones es una alternativa que permite potenciar la eficiencia del sector público en el desarrollo de infraestructura mediante la participación del sector privado. En Chile, la Red Vial Concesionada alcanzó los 3,300 km en el año 2019 y en la agenda de los siguientes 5 años se consideró adicionar al menos 1,000 km de rutas. La valoración de estos proyectos se vuelve un elemento clave en la gestión de los recursos del país, para que a través de él se pueda entregar un buen servicio a la sociedad. Sin embargo, en la actualidad no existe una metodología que permita determinar el valor del Patrimonio Vial Concesionado en Chile, donde solo se ha avanzado en determinar el valor residual de la infraestructura que se volverá a licitar.

Dentro de los activos que forman la Red Vial Concesionada, los pavimentos son una parte fundamental para el servicio a los usuarios y representan entre un 45 % y 75 % del valor total de una carretera, siendo los pavimentos asfálticos la alternativa con mayor predominancia tanto en proyectos concesionados como en caminos y carreteras públicas. Para los caminos pavimentados de la Red Vial Nacional, los pavimentos de asfalto representan el 89 % del total de rutas, mientras que los de hormigón solo alcanzan el 11 %. En las carreteras concesionadas los pavimentos asfálticos representan sobre el 95 % de los kilómetros totales, existiendo muchos proyectos construidos solo con esta materialidad. La actual metodología de valoración para pavimentos asfálticos no se compatibiliza con el nivel de servicio, ni tampoco incluye indicadores de capacidad estructural para el activo.

En base a lo anterior, el presente trabajo de tesis desarrolla un método que permite calcular el valor de los pavimentos asfálticos de una carretera interurbana concesionada, como un instrumento de gestión de la infraestructura vial de nuestro país. El método considera la magnitud de las obras, el estado de conservación, y es compatible con el nivel de servicio entregado a los usuarios de la vía.

En primer lugar, se realiza una recopilación bibliográfica a nivel nacional e internacional permitiendo identificar diferentes enfoques y métodos de valoración aplicables para activos viales. Por medio de un

análisis comparativo se selecciona un método para pavimentos asfálticos en base al enfoque de costos, en particular, utilizando una adaptación del método de valor neto residual basado en costos históricos. Su selección se debe a que el activo es de gran valor con respecto al total de una carretera y se requiere de una valorización precisa y basada en indicadores técnicos apropiados que describan su condición, lo cual se consigue con esta forma de valoración. Además, no existen brechas técnicas, tecnológicas ni de información para su aplicación, ya que para la gestión actual del activo en contratos de concesión está contemplado un servicio de conservación basado en el desempeño de indicadores técnicos, con lo cual se puede valorizar aspectos atribuibles a la gestión del operador privado.

En el método de valor neto residual basado en costos históricos, el valor del activo se calcula como la diferencia entre su costo de construcción y el costo necesario para llevarlo a su estado “como nuevo”, llamado también, costo de rehabilitación. Este último implica que se requiere de actividades de rehabilitación definidas a partir de indicadores técnicos y umbrales de desempeño que describan la condición del pavimento. Una ventaja adicional para su implementación es que en los contratos de concesión también se establecen los precios unitarios de actividades de construcción, mantenimiento y rehabilitación, por lo que su uso hace posible definir el valor inicial del activo (costo histórico) y las formas de cálculo de las pérdidas de valor (costo de rehabilitación) al momento de la licitación.

Para aplicar el método de valoración se considera el desempeño de indicadores técnicos definidos a partir de las características que deben ser evaluadas en los pavimentos en un contexto de gestión global de carreteras. Las características y los respectivos indicadores técnicos considerados son los siguientes: regularidad longitudinal del pavimento (Mean Roughness Index), regularidad transversal del pavimento (Rut Depth), nivel de ruido de rodadura (Overall A-weighted Sound Intensity Level), resistencia al deslizamiento (SFC equivalent) y agrietamientos del pavimento (Porcentaje de agrietamiento). Cada uno de estos indicadores técnicos tiene rangos de umbrales de servicio para cinco niveles de desempeño (Muy Bueno, Bueno, Justo, Malo y Muy Malo), de acuerdo con los estándares de serviciabilidad de carreteras concesionadas.

Un pavimento tiene una vida residual de cero cuando se sobrepasa un cierto nivel en algún indicador, que depende de la serviciabilidad que se espera entregar. A partir de esto y considerando los indicadores y niveles de servicio descritos anteriormente, se define que cuando un indicador alcanza su umbral de desempeño del nivel “Malo”, se tiene una pérdida de valor equivalente al costo de rehabilitación que lleve al pavimento a su condición “como nuevo”, es decir, que el indicador vuelva al nivel “Muy Bueno”. De esta manera, se designa para cada indicador una única actividad de rehabilitación, determinada en función de experiencias prácticas de mantenciones de pavimentos de alto estándar. La definición de una única actividad por indicador y no un conjunto, se realiza con el propósito de reducir la variabilidad, incertidumbre y riesgos del proyecto, ya que se relacionan con una pérdida equivalente de valor del activo y no con el mantenimiento que el operador privado decida finalmente realizar para mejorar la condición del pavimento durante su gestión.

Para determinar el valor del pavimento cuando los indicadores se encuentren en un nivel de desempeño distinto a “Malo”, se propone que el costo de rehabilitación se calcule como un porcentaje del costo de la actividad de rehabilitación definida para cada uno. De esta manera, se definen los siguientes porcentajes

para cada nivel de desempeño, 0%, 25%, 50%, 100% y 200%, respectivamente. Por lo tanto, el costo de rehabilitación por cada indicador se obtiene con el porcentaje en función del nivel de desempeño y el costo de la actividad de rehabilitación. Con el objetivo de llevar al pavimento a su estado como nuevo de forma general, el costo de rehabilitación considera el mayor valor entre los costos por cada indicador técnico.

Para realizar una valoración completa del pavimento, se deben incorporar adicionalmente indicadores de capacidad estructural que no necesariamente son perceptibles por el usuario, pero que si aportan valor al activo. En línea con lo anterior se propone una actividad de rehabilitación a partir del número estructural efectivo proveniente de la deflectometría de impacto para ser incorporada al método de valoración, ya que es un indicador comúnmente utilizado en la evaluación estructural de pavimentos y se ajusta a la metodología ya desarrollada para los demás indicadores. No obstante, subestima la recuperación estructural debido a la factibilidad técnica que tiene que cumplir. Una actividad de rehabilitación más exacta es propuesta de manera preliminar, pero tiene un grado de incertidumbre mayor y requiere de información adicional para su validación.

Por último, el método desarrollado se simula con datos de una carretera interurbana chilena en etapa de explotación. Los resultados visualizan la evolución temporal de los parámetros de valorización tal como el costo de rehabilitación y el porcentaje de pérdida de valor, cuantificando la relación entre el desempeño de los indicadores y el valor final del activo. Por otra parte, mediante la información de deflectometría de impacto es posible cuantificar la subestimación entre las distintas propuestas de valoración de capacidad estructural. La sensibilización realizada no solo permite contar con el respaldo conceptual y técnico del método de valoración, sino también con la arista económica.



# Abstract

The traditional concept of road infrastructure management is based on the conservation of assets, but in recent years it has shifted to the achievement of strategic objectives. For the strategic objective of preservation of road heritage, the valuation of road assets has become one of the most important goals, being an activity that is performed both in Chile and abroad and is essential for the economic and social development of countries. Asset valuation is an effective tool for balancing costs, risks, and management performance.

The concession system is an alternative that makes it possible to enhance the efficiency of the public sector in the development of infrastructure through the participation of the private sector. In Chile, the Concessioned Road Network reached 3,300 km in 2019 and in the agenda for the next 5 years it was considered to add at least 1,000 km of routes. The valuation of these projects becomes a key element in the management of the country's resources, so that through it a good service can be delivered to society. However, at present there is no methodology that allows determining the value of the Concessioned Road Assets in Chile, where only progress has been made in determining the residual value of the infrastructure to be tendered again.

Among the assets that make up the Concessioned Road Network, pavements are a fundamental part for the service to users and represent between 45 % and 75 % of the total value of a highway, with asphalt pavements being the most prevalent alternative both in terms of concessioned projects such as public roads and highways. For the paved roads of the National Road Network, asphalt pavements represent 89 % of the total routes, while concrete pavements only reach 11 %. Asphalt pavements represent over 95 % of the total kilometers on concessioned highways, and there are many projects built only with this materiality. The current valuation methodology for asphalt pavements is not compatible with the level of service, nor does it include indicators of structural capacity for the asset.

Based on the above, this thesis work develops a method that allows calculating the value of the asphalt pavements of a concessioned interurban highway, as a management instrument for the road infrastructure of our country. The method considers the magnitude of the works, the state of conservation, and is compatible with the level of service provided to road users.

In the first place, a bibliographic compilation is carried out at the national and international level, allowing the identification of different approaches and valuation methods applicable to road assets. Through a comparative analysis, a method for asphalt pavements is selected based on the cost approach using an

adaptation of the residual net value method based on historical costs. Its selection is because the asset is of great value with respect to the total of a road and requires a precise valuation and based on appropriate technical indicators that describe its condition, which is achieved with this form of valuation. In addition, there are no technical, technological or information gaps for its application, since for the current management of the asset in concession contracts, a conservation service based on the performance of technical indicators is contemplated, with which aspects attributable to the management of the private operator.

In the historical cost-based residual net value method, the asset's value is calculated as the difference between its construction cost and the cost necessary to bring it to its "as-new" condition, also called the cost of rehabilitation. The latter implies that rehabilitation activities are required defined from technical indicators and performance thresholds that describe the condition of the pavement. An additional advantage for its implementation is that the concession contracts also establish the unit prices of construction, maintenance and rehabilitation activities, so its use makes it possible to define the initial value of the asset (historical cost) and the forms of calculation loss of value (restoration cost) at the time of the tender.

To apply the valuation method, the performance of technical indicators defined from the characteristics that must be evaluated in the pavements in a context of global road management is considered. The characteristics and the respective technical indicators considered are the following: longitudinal road profile (Mean Roughness Index), longitudinal surface depression (Rut Depth), noise level in travelled way surface (Overall A-weighted Sound Intensity Level), skid resistance (SFC equivalent) and pavement cracking (Cracking percentage). Each of these technical indicators has ranges of service thresholds for five performance levels (Very Good, Good, Fair, Poor and Very Poor), in accordance with the serviceability standards of concessioned highways.

A pavement has a residual life of zero when a certain level is exceeded in some indicator, which depends on the serviceability that it is expected to deliver. Based on this and considering the indicators and service levels described above, it is defined that when an indicator reaches its performance threshold of the "Poor" level, there is a loss in value equivalent to the cost of rehabilitation that brings the pavement to its condition "as new", that is, the indicator returns to the "Very Good" level. In this way, a single rehabilitation activity is designated for each indicator, determined based on practical experiences of high standard pavement maintenance. The definition of a single activity per indicator and not a set, is carried out with the purpose of reducing the variability, uncertainty, and risks of the project, since they are related to an equivalent loss of value of the asset and not to the maintenance that the private operator finally decides to carry out to improve the condition of the pavement during its management.

To determine the value of the pavement when the indicators are at a performance level other than "Poor", it is proposed that the rehabilitation cost be calculated as a percentage of the cost of the rehabilitation activity defined for each one. In this way, the following percentages are defined for each performance level, 0%, 25%, 50%, 100% and 200%, respectively. Therefore, the cost of rehabilitation for each indicator is obtained with the percentage based on the level of performance and the cost of the rehabilitation activity. To bring the pavement to its general condition as new, the cost of rehabilitation considers the highest value among the costs for each technical indicator.

To carry out a complete assessment of the pavement, indicators of structural capacity must also be incorporated that are not necessarily perceptible by the user, but that do add value to the asset. In line with the above, a rehabilitation activity is proposed based on the effective structural number (S<sub>Neff</sub>) from the impact deflectometry to be incorporated into the valuation method, since it is an indicator commonly used in the structural evaluation of pavements and adjusts to the methodology already developed for the other indicators. However, it underestimates the structural recovery due to the technical feasibility that it must meet. A more exact rehabilitation activity is preliminary proposed but has a higher degree of uncertainty and requires additional information for its validation.

Finally, the developed method is simulated with data from a Chilean interurban highway in the exploitation stage. The results visualize the temporal evolution of the valuation parameters such as the cost of rehabilitation and the percentage of loss of value, quantifying the relationship between the performance of the indicators and the final value of the asset. On the other hand, by means of the impact deflectometry information, it is possible to quantify the underestimation between the different structural capacity assessment proposals. The awareness-raising carried out not only allows for the conceptual and technical support of the valuation method, but also the economic edge.



# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XV</b>
<b>Contenido</b>	<b>XXI</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XXV</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XXIX</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Hipótesis</b>	<b>4</b>
<b>Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>1. Definición conceptual del método de valoración de pavimentos asfálticos</b>	<b>6</b>
1.1. Revisión del estado del arte y la práctica en la valoración de activos viales . . . . .	7
1.1.1. Enfoques y métodos de valoración de activos . . . . .	7
1.1.2. Métodos empleados actualmente en la valoración de activos viales . . . . .	18
1.1.3. Metodología para determinar el valor del Patrimonio Vial en Chile . . . . .	19
1.1.4. Enfoque de valoración del Patrimonio Vial en nuevos contratos de concesiones chilenas . . . . .	25
1.2. Análisis comparativo de métodos de valoración . . . . .	27
1.2.1. Contexto para elección de método . . . . .	27
1.2.2. Análisis de métodos . . . . .	29
1.2.3. Selección método de valoración . . . . .	33
<b>2. Método de valoración para calzada principal</b>	<b>35</b>
2.1. Cálculo del costo histórico . . . . .	36
2.1.1. Formulación del costo histórico . . . . .	37

2.1.2.	Consideración de nuevas inversiones . . . . .	39
2.2.	Definiciones para el cálculo del costo de rehabilitación . . . . .	40
2.2.1.	Indicadores técnicos y umbrales de desempeño . . . . .	40
2.2.2.	Pérdidas por nivel de desempeño . . . . .	43
2.3.	Actividades de rehabilitación por indicador técnico . . . . .	48
2.3.1.	Regularidad longitudinal del pavimento . . . . .	48
2.3.2.	Regularidad transversal del pavimento . . . . .	49
2.3.3.	Nivel de ruido de rodadura . . . . .	50
2.3.4.	Resistencia al deslizamiento . . . . .	51
2.3.5.	Agrietamiento . . . . .	52
2.3.6.	Deflexiones del pavimento . . . . .	53
2.3.7.	Número estructural efectivo . . . . .	55
2.3.7.1.	Definición de actividad de rehabilitación . . . . .	58
2.3.7.2.	Métodos de tramificación . . . . .	62
2.3.8.	Esquema y fórmulas por costo de desempeño . . . . .	73
2.4.	Costos adicionales para valoración . . . . .	76
2.4.1.	Costos por demarcación del pavimento . . . . .	76
2.4.2.	Costos indirectos . . . . .	81
<b>3.</b>	<b>Caso de estudio</b>	<b>83</b>
3.1.	Caracterización de la vía e información disponible . . . . .	84
3.1.1.	Características de la vía . . . . .	84
3.1.2.	Características de la información disponible . . . . .	84
3.2.	Evolución temporal del desempeño de los indicadores . . . . .	87
3.2.1.	Pista 1 . . . . .	87
3.2.2.	Pista 2 . . . . .	89
3.2.3.	Pista 3 . . . . .	91
3.2.4.	Pista 4 . . . . .	94
3.2.5.	Análisis general de la evolución de indicadores . . . . .	96
3.3.	Consideraciones para el costo histórico y de rehabilitación . . . . .	98
3.4.	Resultados de valorización . . . . .	100
3.4.1.	Pista 1 . . . . .	100
3.4.2.	Pista 2 . . . . .	103
3.4.3.	Pista 3 . . . . .	107
3.4.4.	Pista 4 . . . . .	110
3.4.5.	Comparación entre pistas . . . . .	114
3.5.	Comparación métodos de tramificación . . . . .	115
3.6.	Relación entre nivel de servicio y valor del activo . . . . .	117
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>119</b>
4.1.	Conclusiones por objetivos . . . . .	119
4.2.	Comentarios generales . . . . .	122
4.3.	Investigaciones futuras . . . . .	123

<b>Referencias</b>	<b>124</b>
<b>Apéndices</b>	<b>130</b>
<b>A. Indicadores técnicos del modelo de nivel de servicio</b>	<b>131</b>
A.1. Mean Roughness Index (MRI) . . . . .	132
A.2. Rut Depth (RD) . . . . .	134
A.3. Overall Sound Intensity Level (OASI) . . . . .	136
A.4. SFC equivalente . . . . .	138
A.5. Porcentaje de agrietamiento . . . . .	140
A.6. Deflexión máxima ( $D_0$ ) . . . . .	142
A.7. Índice de capa base (BLI) . . . . .	144
A.8. Índice de capa media (MLI) . . . . .	145
A.9. Índice de capa inferior (LLI) . . . . .	146
<b>B. Gráficos y tablas de datos para cálculo del costo de rehabilitación</b>	<b>147</b>
B.1. Curvas para la proyección del costo de rehabilitación . . . . .	148
B.2. Detalle de partidas para actividades de rehabilitación . . . . .	151
B.3. Comparación métodos de tramificación . . . . .	154
B.4. Evolución ratio NEefectivo/NEdiseño . . . . .	155
<b>C. Datos y resultados caso de estudio</b>	<b>156</b>
C.1. Evolución temporal de desempeño de pistas . . . . .	157
C.2. Tramificaciones . . . . .	161
C.3. Resultados complementarios por pistas . . . . .	162
C.3.1. Pista 1 . . . . .	162
C.3.2. Pista 2 . . . . .	164
C.3.3. Pista 3 . . . . .	166
C.3.4. Pista 4 . . . . .	168
<b>D. Metodologías alternativas para valoración de capacidad estructural</b>	<b>170</b>
D.1. Metodología preliminar para deflexiones del pavimento . . . . .	171
D.1.1. Definición de actividades de rehabilitación por indicador técnico . . . . .	175
D.1.2. Formulación del costo de rehabilitación . . . . .	178
D.1.3. Detalle de partidas por indicador técnico . . . . .	179
D.2. Metodología alternativa para número estructural efectivo . . . . .	182
D.2.1. Definición de un indicador técnico . . . . .	185
D.2.2. Detalle de partidas por indicador técnico . . . . .	190
<b>E. Aplicación metodología alternativa para número estructural efectivo</b>	<b>192</b>
E.1. Resultados pista 3 . . . . .	193
E.2. Resultados pista 4 . . . . .	194

# Índice de figuras

1.1.1.	Ilustración conceptual del método de depreciación sigmoïdal y sigmoïdal inverso. . . . .	8
1.1.2.	Ilustración conceptual del método de valor fijo con respecto a la condición límite. . . . .	10
1.1.3.	Ilustración conceptual del método de valor neto residual. . . . .	11
1.1.4.	Esquema general de los activos para el cálculo del Patrimonio Vial en Chile. . . . .	19
1.1.5.	Árbol de decisión para asignación de acciones de conservación en pavimentos asfálticos. . . . .	22
1.2.1.	Esquema del modelo de Nivel de Servicio. . . . .	27
2.1.1.	Perfil tipo de Concesión Santiago-Colina-Los Andes. . . . .	38
2.2.1.	Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador MRI. . . . .	46
2.2.2.	Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador RD. . . . .	46
2.3.1.	Cuenco de deflexiones resultante del ensayo de deflectometría de impacto. . . . .	53
2.3.2.	Aporte estructural de un recapado asfáltico sobre un pavimento rígido o flexible. . . . .	56
2.3.3.	Relación entre deflexión máxima y el número estructural efectivo del pavimento. . . . .	57
2.3.4.	Comparación y línea de acción entre NE efectivo y NE diseño del pavimento. . . . .	58
2.3.5.	Comportamiento del ratio NEefectivo/NEdiseño para datos reales de una carretera chilena. . . . .	62
2.3.6.	Comportamiento variable $Z_c$ para datos reales de una carretera chilena. . . . .	65
2.3.7.	Comparación de métodos de tramificación para datos reales de una carretera chilena. . . . .	67
2.3.8.	Evolución temporal del ratio NEefectivo/NEdiseño para diferentes métodos de tramificación. . . . .	69
2.3.9.	Esquema para el costo de rehabilitación de pavimentos asfálticos. . . . .	73
2.4.1.	Ejemplos de carreteras interurbanas chilenas con pavimentos asfálticos. . . . .	77
2.4.2.	Disposición de tachas en líneas segmentadas de eje y pistas. . . . .	78
3.2.1.	Evolución temporal del indicador MRI - Pista 1. . . . .	87
3.2.2.	Evolución temporal del indicador RD - Pista 1. . . . .	87
3.2.3.	Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 1. . . . .	88
3.2.4.	Evolución temporal del indicador porcentaje de Agrietamiento - Pista 1. . . . .	88
3.2.5.	Evolución temporal del indicador MRI - Pista 2. . . . .	89
3.2.6.	Evolución temporal del indicador RD - Pista 2. . . . .	89

3.2.7. Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 2. . . . .	90
3.2.8. Evolución temporal del indicador porcentaje de Agrietamiento - Pista 2. . . . .	90
3.2.9. Evolución temporal del indicador MRI - Pista 3. . . . .	91
3.2.10. Evolución temporal del indicador RD - Pista 3. . . . .	91
3.2.11. Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 3. . . . .	92
3.2.12. Evolución temporal del indicador porcentaje de Agrietamiento - Pista 3. . . . .	92
3.2.13. Evolución temporal del ratio de capacidad estructural (Tramif: 1km) - Pista 3. . . . .	93
3.2.14. Evolución temporal del indicador MRI - Pista 4. . . . .	94
3.2.15. Evolución temporal del indicador RD - Pista 4. . . . .	94
3.2.16. Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 4. . . . .	95
3.2.17. Evolución temporal del indicador Porcentaje de agrietamiento - Pista 4. . . . .	95
3.2.18. Evolución temporal del ratio de capacidad estructural (Tramif: 1km) - Pista 4. . . . .	96
3.4.1. Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 1. . . . .	101
3.4.2. Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 1. . . . .	103
3.4.3. Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 2. . . . .	104
3.4.4. Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 2. . . . .	105
3.4.5. Evolución temporal del costo de rehabilitación total - Pistas 1 y 2. . . . .	106
3.4.6. Evolución temporal del porcentaje de pérdida total de valor - Pistas 1 y 2. . . . .	106
3.4.7. Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 3. . . . .	108
3.4.8. Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 3 (Tramif:1km). . . . .	109
3.4.9. Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 4. . . . .	111
3.4.10. Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 4. . . . .	112
3.4.11. Evolución temporal del costo de rehabilitación total - Pistas 3 y 4. . . . .	113
3.4.12. Evolución temporal del porcentaje de pérdida total de valor - Pistas 3 y 4. . . . .	113
3.4.13. Evolución temporal del costo de rehabilitación total - Pistas 1 a 4. . . . .	114
3.4.14. Evolución temporal del porcentaje de pérdida total - Pistas 1 a 4. . . . .	114
3.5.1. Parámetros de valoración según método de tramificación - Pista 3 y 4. . . . .	116
3.6.1. Porcentaje de pérdida según nivel de desempeño de indicador técnico. . . . .	118
3.6.2. Distribución del costo de rehabilitación y kilómetros por indicador técnico - Pista 2 (2018). . . . .	118
A.1.1. Ficha técnica para evaluar la regularidad longitudinal del pavimento. . . . .	132
A.1.2. Protocolo de calificación por sección de la carretera. . . . .	132
A.1.3. Protocolo de calificación global del indicador. . . . .	133
A.2.1. Ficha técnica para evaluar la regularidad transversal del pavimento. . . . .	134
A.2.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	134
A.2.3. Protocolo de calificación global del indicador. . . . .	135
A.3.1. Ficha técnica para evaluar el nivel de ruido de rodadura. . . . .	136
A.3.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	136
A.3.3. Protocolo de calificación global del indicador. . . . .	137
A.4.1. Ficha técnica para evaluar la resistencia al deslizamiento del pavimento. . . . .	138
A.4.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	138
A.4.3. Protocolo de calificación global del indicador. . . . .	139

A.5.1. Ficha técnica para evaluar el porcentaje de agrietamiento en pavimentos. . . . .	140
A.5.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	140
A.5.3. Protocolo de calificación global del indicador. . . . .	141
A.6.1. Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural general D0 en pavimentos. . . . .	142
A.6.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	142
A.6.3. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	143
A.6.4. Protocolo de calificación global del indicador. . . . .	143
A.7.1. Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural de capa base en pavimentos. . . . .	144
A.7.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	144
A.8.1. Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural de capas medias en pavimentos. . .	145
A.8.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	145
A.9.1. Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural de capas bajas y subrasante en pavimentos. . . . .	146
A.9.2. Protocolo de calificación para cada sección de la carretera. . . . .	146
B.1.1. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador OASI. . . . .	148
B.1.2. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador SFC equiv. . . . .	148
B.1.3. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador Porcentaje de agrietamiento. . . . .	149
B.1.4. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador $D_0$ (EE mayor a 20 millones y base granular). . . . .	149
B.1.5. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador BLI (base granular). . . . .	150
B.1.6. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador MLI (base granular). . . . .	150
B.1.7. Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador LLI (base granular). . . . .	151
C.3.1. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 1. . . . .	162
C.3.2. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 1 (continuación). . . . .	163
C.3.3. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 2. . . . .	164
C.3.4. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 2 (continuación). . . . .	165
C.3.5. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 3 (Tramif:1km). . . . .	166
C.3.6. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 3 (Tramif:1km, cont.). . .	167
C.3.7. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 4 (tramif:1km). . . . .	168
C.3.8. Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 4 (tramif:1km, cont.). . .	169
D.1.1. Respuestas de deflexión diferentes con indicadores similares. . . . .	171
D.1.2. Matriz de decisión para el sistema de reglas - SIDSoluciones. . . . .	172
D.1.3. Notas de calidad Q basadas en categorías de FWD y rangos de IRI. . . . .	173
D.1.4. Agrupación de las notas de calidad para definición de estrategias. . . . .	174

---

D.1.5. Esquema para el costo de rehabilitación de pavimentos asfálticos (propuesta preliminar). . . . .	179
D.2.1. Comparación y línea de acción entre NE efectivo y NE diseño del pavimento. . . . .	182
D.2.2. Esquema de paquete estructural típico de pavimentos asfálticos. . . . .	183
D.2.3. Relación ratio $CR_{Rehab}/CR_{Reconstrucción}$ vs ICE según nivel de desempeño de Agrietamiento. . . . .	186
D.2.4. Relación ratio $CR_{Rehab}/CR_{Reconstrucción}$ vs ICE según nivel de desempeño de Agriet. . . . .	187
D.2.5. Relación ratio $CR_{Rehab}/CR_{Reconstrucción}$ vs ICE por tramos de diseño. . . . .	188
E.1.1. Comparación de costos de rehabilitación para metodologías de capacidad estructural - Pista 3 (Tram:1km). . . . .	193
E.2.1. Comparación de costos de rehabilitación para metodologías de capacidad estructural - Pista 4 (Tram:1km). . . . .	194

# Índice de tablas

1.1.1.	Potenciales indicadores para factores claves (Peters & Zhang, 2014). . . . .	17
1.1.2.	Experiencia internacional en valoración de activos viales (MOP, 2015). . . . .	18
1.1.3.	Acciones de conservación para pavimentos asfálticos (MOP, 2020-b). . . . .	21
1.1.4.	Límites de intervención para pavimentos asfálticos (MOP, 2004). . . . .	21
2.1.1.	Ejemplos de partidas involucradas en el cálculo del costo histórico de pavimentos flexibles. . . . .	36
2.1.2.	Precios Unitarios Oficiales sin IVA (Adaptado de MOP, 1996). . . . .	38
2.2.1.	Características e indicadores técnicos a emplear en la valoración de pavimentos flexibles. . . . .	40
2.2.2.	Umbrales por nivel de desempeño a emplear en la valoración de pavimentos flexibles. . . . .	41
2.2.3.	Umbrales por nivel de desempeño de $D_0$ en carreteras con EE de diseño mayor a 20 millones. . . . .	41
2.2.4.	Umbrales por nivel de desempeño de $D_0$ en carreteras con EE de diseño entre 10 y 20 millones. . . . .	42
2.2.5.	Umbrales por nivel de desempeño de BLI empleados en la valoración de pavimentos flexibles. . . . .	42
2.2.6.	Umbrales por nivel de desempeño de MLI empleados en la valoración de pavimentos flexibles. . . . .	42
2.2.7.	Umbrales por nivel de desempeño de LLI empleados en la valoración de pavimentos flexibles. . . . .	43
2.2.8.	Ejemplo de porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador MRI en pavimentos flexibles. . . . .	44
2.2.9.	Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicadores técnicos de pavimentos flexibles. . . . .	47
2.3.1.	Estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos flexibles (Adaptado de MDS, 2017). . . . .	48
2.3.2.	Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador MRI en pavimentos flexibles. . . . .	48
2.3.3.	Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador RD en pavimentos flexibles. . . . .	49
2.3.4.	Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador OASI en pavimentos flexibles. . . . .	50
2.3.5.	Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador SFC equiv. en pavimentos flexibles. . . . .	51

2.3.6.	Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador Porcentaje de agrietamiento en pavimentos flexibles. . . . .	52
2.3.7.	Indicadores técnicos para la evaluación de deflexiones del pavimento (Burgos, 2019). . . . .	54
2.3.8.	Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación por deflectometría de impacto. . . . .	59
2.3.9.	Tramificación por método de diferencias acumuladas Tramo 4. . . . .	66
2.3.10.	Comparación de métodos de tramificación. . . . .	68
2.3.11.	Ejemplo del comportamiento del ratio para tramificación por 1 km. . . . .	70
2.3.12.	Resumen de actividades de rehabilitación por indicador técnico. . . . .	74
2.3.13.	Ejemplo del desempeño y costo de rehabilitación de dos secciones de pavimento. . . . .	74
2.4.1.	Relación demarcación/brecha en líneas de pistas, Tabla 6.303.401.A (MOP, 2020-e). . . . .	77
2.4.2.	Partidas, bases de medición y cantidad de obra para cálculo del costo de rehabilitación por demarcación plana y elevada. . . . .	78
2.4.3.	Ejemplos para costo de demarcación asociado al desempeño del pavimento. . . . .	80
3.1.1.	Estructura y espesores de pavimento por tramo de diseño. . . . .	84
3.1.2.	Cantidad de secciones de 200 m consideradas para la valorización. . . . .	85
3.3.1.	Partidas, bases de medición y precios unitarios considerados para el costo histórico (MOP, 2019-a; MOP, 2021). . . . .	98
3.3.2.	Partidas, bases de medición y precios unitarios considerados para el costo de rehabilitación (MOP, 2019-a; MOP, 2021). . . . .	98
3.3.3.	Partidas, bases de medición y precios unitarios considerados para el costo por demarcación del pavimento (MOP, 2019-a; MOP, 2021). . . . .	99
3.4.1.	Resultados metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 1. . . . .	101
3.4.2.	Resultados metodología de valorización - Pista 1. . . . .	102
3.4.3.	Resultados de metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 2. . . . .	103
3.4.4.	Resultados metodología de valorización - Pista 2. . . . .	105
3.4.5.	Resultados metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 3. . . . .	107
3.4.6.	Resultados metodología de valorización - Pista 3. . . . .	109
3.4.7.	Resultados metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 4. . . . .	110
3.4.8.	Resultados metodología de valorización - Pista 4. . . . .	112
3.6.1.	Costo de rehabilitación según indicador técnico (precios unitarios MOP, 2019-a; MOP, 2021). . . . .	117
3.6.2.	Costo de rehabilitación en UF según nivel de desempeño del indicador técnico. . . . .	117
B.2.1.	Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador MRI y RD en pavimentos flexibles. . . . .	151
B.2.2.	Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador OASI en pavimentos flexibles. . . . .	152
B.2.3.	Partidas, bases de medición y cantidad de obra para cálculo del costo de rehabilitación de indicador SFC equiv. en pavimentos flexibles. . . . .	152
B.2.4.	Partidas y bases de medición para actividad de rehabilitación de indicador Agrietamiento en pavimentos flexibles. . . . .	153

B.3.1. Datos comparación métodos de tramificación - Tramo 4 diseño. . . . .	154
B.4.1. Tramificación 1km. . . . .	155
B.4.2. Tramificación 4km. . . . .	155
B.4.3. Tramificación método diferencias acumuladas. . . . .	155
C.1.1. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 1). . . . .	157
C.1.2. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 1). . . . .	157
C.1.3. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCEq. (Pista 1). . . . .	157
C.1.4. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de %Agrt. (Pista 1). . . . .	158
C.1.5. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 2). . . . .	158
C.1.6. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 2). . . . .	158
C.1.7. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCEq. (Pista 2). . . . .	158
C.1.8. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de % Agrt. (Pista 2). . . . .	159
C.1.9. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 3). . . . .	159
C.1.10. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 3). . . . .	159
C.1.11. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCEq. (Pista 3). . . . .	159
C.1.12. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de %Agrt. (Pista 3). . . . .	160
C.1.13. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 4). . . . .	160
C.1.14. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 4). . . . .	160
C.1.15. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCEq. (Pista 4). . . . .	160
C.1.16. Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de %Agrt. (Pista 4). . . . .	161
C.2.1. Tramificación por método: sectores de longitud constante - Pista 3 y 4. . . . .	161
C.2.2. Tramificación por método de diferencias acumuladas - Pista 3. . . . .	161
C.2.3. Tramificación por método de diferencias acumuladas - Pista 4. . . . .	161
D.1.1. Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador <i>BLI</i> (caso base granular). . . . .	175
D.1.2. Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador <i>MLI</i> (caso base granular). . . . .	176
D.1.3. Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador <i>LLI</i> (caso base granular). . . . .	176
D.1.4. Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador <i>D<sub>0</sub></i> (caso base granular, EE>20 millones). . . . .	177
D.1.5. Indicadores técnicos considerados en la valoración de pavimentos flexibles (propuesta preliminar). . . . .	177
D.1.6. Ejemplos de niveles de desempeño de los indicadores de capacidad estructural. . . . .	178
D.1.7. Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador <i>BLI</i> (caso capas granulares). . . . .	180

D.1.8. Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador MLI (caso capas granulares). . . . .	180
D.1.9. Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador LLI (caso capas granulares). . . . .	181
D.1.10. Partidas y bases de medición para actividad de rehabilitación de indicador $D_0$ (caso capas granulares). . . . .	181
D.2.1. Coeficientes estructurales recomendados para pavimentos existentes, Tabla 3.605.203.A (MOP, 2019-c). . . . .	182
D.2.2. Propuesta de coeficientes estructurales para capas asfálticas en función del nivel de desempeño del indicador de Agrietamiento. . . . .	183
D.2.3. Propuesta de actividades de rehabilitación a partir del NE efectivo. . . . .	184
D.2.4. Espesor asfáltico y número estructural de diseño por tramos para vía analizada. . . . .	188
D.2.5. Valor límite de ICE que define la actividad de rehabilitación para la vía analizada. . . . .	188
D.2.6. Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador ICE en pavimentos flexibles (propuesta 1). . . . .	189
D.2.7. Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador ICE en pavimentos flexibles (propuesta 2). . . . .	190
D.2.8. Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador ICE (caso capas granulares). . . . .	191
E.1.1. Resultados metodología de valorización - Pista 3 (Tramif:1km). . . . .	193
E.1.2. Comparación costos por deflectometría de impacto - Pista 3 (Tramif:1km). . . . .	194
E.2.1. Resultados metodología de valorización - Pista 4 (Tramif:1km). . . . .	194
E.2.2. Comparación costos por deflectometría de impacto - Pista 4 (Tramif:1km). . . . .	195
E.2.3. Factores de comparación de costos totales. . . . .	195

# Introducción

Las carreteras y caminos constituyen una importante fracción del patrimonio público del país, posibilitan la ocupación y explotación del territorio, además de permitir la comunicación de sus habitantes. La insuficiencia de recursos, sumado a la ausencia de conservación eficiente y eficaz, pueden provocar con el tiempo pérdidas sustantivas del Patrimonio Vial (MOP, 2010-b).

La gestión de infraestructura vial permite diagnosticar, evaluar, planificar y programar objetivamente el mantenimiento de los activos viales en toda su vida útil, optimizando el uso de los recursos disponibles (de Solminihac et al., 2018). La tendencia mundial en la gestión de las carreteras ha avanzado en los últimos años desde un enfoque en las obras mismas hacia un enfoque en objetivos estratégicos (Groce et al., 2002; Russel and Sharp, 2009; Scott et al., 2011; Howard, 2011; Caimey, 2016; de Solminihac et al., 2018; Amekudzi-Kennedy et al., 2018). La literatura también coincide en que tres de los principales objetivos estratégicos son el servicio a los usuarios que transitan por la vía, la preservación del patrimonio vial, y el beneficio a las comunidades y medio ambiente aledaños a la infraestructura (OECD, 1997; CICCIP, 2005; NCHRP, 2010; Martin et al., 2016; Austroads, 2016; Delgadillo et al., 2018; Muñoz, 2020).

Según la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la Federal Highway Administration (FHWA), un elemento clave de la gestión de activos de carreteras es la determinación del valor total de los activos existentes. La valoración de activos se define como la asignación de valor monetario a la infraestructura en función de su tamaño, antigüedad, condición, costo de reemplazo o costo original de construcción. Sin embargo, este concepto es ambiguo porque el significado varía para distintas disciplinas. Para un economista, el valor de la infraestructura consiste en su contribución a la actividad económica. En opinión del economista, el valor de las carreteras puede determinarse por la generación de ahorro de tiempo de viaje, reducción de accidentes o actividad económica. Para un empresario, el potencial de generación de ingresos o el precio de mercado de activos comparables determina su valor (FHWA, 2016).

La valoración de activos es un método de seguimiento de la eficacia de la gestión de activos y también es una técnica para facilitar la traducción de las evaluaciones de ingeniería en términos financieros para su consideración a nivel contable. Existen varios enfoques para la valoración de activos, incluidos los métodos de depreciación basados en condiciones y basados en la edad. Si bien no se acepta universalmente un enfoque único, muchos administradores de activos prefieren el enfoque basado en condiciones (Austroads, 2018).

Las agencias de carreteras requieren el conocimiento del valor total de sus activos por una variedad de razones, que incluyen la administración de sus finanzas, la evaluación de inversiones y una gestión adecuada de la infraestructura mediante el monitoreo y enfoque en las inversiones de valor agregado mientras se minimizan las pérdidas (Dojutrek et al., 2012; MOP, 2016-b; Gómez, 2020). Otro fundamento importante es medir la responsabilidad de una agencia o la administración del Estado en cuanto a la conservación del Patrimonio Vial, entendiendo este, como todos los elementos físicos que prestan un servicio de forma directa o indirecta a los usuarios, cuyo valor puede ser calculado en términos monetarios. En Chile, uno de los motivos importantes para efectuar el cálculo del Patrimonio Vial es destinar recursos para conservar dicho patrimonio o mejor aún, incrementarlo.

Es importante destacar que lo fundamental en la gestión de activos es el cambio relativo del valor del Patrimonio Vial, con el fin de poder estimar la magnitud y la velocidad de la pérdida o ganancia. Esto último implica que el cálculo debe efectuarse periódicamente, para poder comparar el valor en ese momento con el valor de algún momento anterior; el conocimiento del valor absoluto del Patrimonio Vial es de importancia secundaria. Para la infraestructura vial chilena del año 2013, se calculó que tenía un valor cercano a los 27,000 millones de dólares, principalmente aportado por caminos y carreteras pavimentadas. Esta cifra representa un incremento del 1.0% con respecto al valor del año 2011 (MOP, 2016-b).

Según el informe de dimensionamiento y características de la Red Vial Nacional 2020 (MOP, 2020-a), donde se resume la longitud de la red chilena a diciembre del año 2019, de los casi 86,000 km solo el 24.5% de estos se encuentran pavimentados (asfalto, hormigón o básico intermedio), un 19.3% tienen una solución básica (capa de protección o granular estabilizado) y el 56.3% restante no se encuentra pavimentado (ripio o tierra). Esto significa que al menos el 75% de las rutas públicas requieren de un mantenimiento o rediseño mayor, que de llevarse a cabo, generaría un aumento considerable en el valor del Patrimonio Vial de Chile. No obstante, los recursos son escasos y deben administrarse de manera eficiente mediante herramientas de gestión y análisis estratégico, lo que hace atractiva la alternativa del Sistema de Concesiones tanto para nuevos proyectos como para el mejoramiento de rutas existentes.

Respecto de la inversión privada en obras públicas, entre los años 1995 y 2015 se ha invertido anualmente alrededor de 700 millones de dólares (inversión ejecutada) en infraestructura concesionada (MOP, 2016-a). De estos montos, la mayor parte corresponde a infraestructura vial. La correcta gestión de esta significativa parte del patrimonio que se encuentra en manos privadas, y el control apropiado de esta gestión por parte de la Dirección General de Concesiones (DGC), depende significativamente de las herramientas con que cuente la institución estatal para la valorización del patrimonio al momento de entregarlo en concesión al privado, como también cuando lo recibe de vuelta al final del período de concesión.

Adicionalmente, dentro de los compromisos asumidos por el país al incorporarse a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), está la valorización sistemática de los activos públicos. Es por esta razón, que la Contraloría General de la República instruyó en el año 2015 a todas las reparticiones estatales, incluido el Ministerio de Obras Públicas (MOP), la tarea de tener una valorización de la infraestructura administrada por la institución (CGR, 2015). Por lo tanto, la mejora continua en las metodologías de valorización del patrimonio es una necesidad tanto interna para mejorar la gestión de los activos, como externa debido a nuestros compromisos internacionales.

Bajo este contexto, no solo se quiere desarrollar metodologías de valoración económica como herramienta para la gestión del Patrimonio Vial Concesionado, sino que se quiere tener una mayor integración de los objetivos estratégicos (preservación del patrimonio vial y servicio al usuario) definiendo un método que sea compatible con el nivel de servicio entregado al usuario y que refleje la condición real de los activos.

Una valoración completa del Patrimonio Vial Concesionado requiere la evaluación de todos los activos que componen una carretera, ya sean pavimentos, puentes, túneles, pasarelas, etc. Los pavimentos representan una parte fundamental de cualquier proyecto vial y es el activo más estudiado en la valoración económica a nivel internacional (MOP, 2015). Por otra parte, en Chile, los pavimentos asfálticos representan el mayor porcentaje de rutas a nivel nacional, por lo que este estudio solo se enfoca en desarrollar un método para las carreteras de esta materialidad. Sin embargo, el presente trabajo de investigación forma parte de los resultados del proyecto FONDEF ID20I10072: “Metodología de Valorización del Patrimonio Vial Compatible con el Nivel de Servicio a los Usuarios” que se desarrollará entre los años 2021 y 2023, en el cual se estudiarán y generarán métodos para los demás activos y la integración en un modelo general.

Para desarrollar el método requerido, este trabajo de tesis se estructura en 4 capítulos. En el capítulo 1, se realiza una conceptualización para definir el método de valoración, por medio de una revisión bibliográfica tanto a nivel nacional como internacional, con respecto a la valoración de activos viales. Por medio de un análisis comparativo de los métodos encontrados, se selecciona el método más apropiado al contexto de estudio.

En el capítulo 2, se desarrolla el método de valoración para pavimentos asfálticos, incluyendo la definición del costo histórico y el costo de rehabilitación para llevar al activo a su condición inicial “como nuevo”. Se detallan todas las consideraciones necesarias para su aplicación.

En el capítulo 3, se sensibiliza el método de valoración con datos reales de una carretera chilena en etapa de explotación, analizando los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 4, se presentan las conclusiones y se establecen futuras líneas de investigación.

# Hipótesis

Una valorización de los pavimentos asfálticos de carreteras concesionadas que sea compatible con el nivel de servicio y que incluya el estado de capacidad estructural de estos, posee mayor nivel de precisión y exactitud que las metodologías actuales de valoración.

# Objetivos

## Objetivo general:

- Desarrollar, implementar y evaluar un método de valoración del activo pavimentos asfálticos en carreteras interurbanas concesionadas, que sea implementable en bases de licitación y compatible con el nivel de servicio a los usuarios.

## Objetivos específicos:

- Conceptualizar un método de valoración de pavimentos asfálticos que vincule el nivel de servicio a los usuarios con el valor del activo y que sea susceptible de implementación en carreteras interurbanas concesionadas.
- Incluir adicionalmente en el método de valoración, indicadores de capacidad estructural que no son perceptibles por el usuario.
- Ejemplificar el método utilizando datos reales de carreteras interurbanas concesionadas en etapa de explotación.

# Capítulo 1

## Definición conceptual del método de valoración de pavimentos asfálticos

El presente capítulo tiene por objetivo definir la estructura conceptual del método de valoración de pavimentos asfálticos. En base a esto, el capítulo se distribuye de la siguiente forma:

- En la Sección 1.1, se presenta una síntesis de la revisión del estado del arte y la práctica con respecto a la valoración de activos viales.
- En la Sección 1.2, se realiza un análisis de los métodos de valoración revisados en la sección anterior y se presentan las razones para la elección del método para la valorización de los pavimentos asfálticos de carreteras interurbanas concesionadas.

## 1.1. Revisión del estado del arte y la práctica en la valoración de activos viales

### 1.1.1. Enfoques y métodos de valoración de activos

De la revisión bibliográfica es posible concluir que existen diversas técnicas de valoración de activos, que en general, pueden clasificarse según el tipo de valor considerado y el periodo de tiempo para la valoración (Amekudzi-Kennedy et al., 2002; Cowe Falls, 2004; Alyami & Tighe, 2016). A partir de esto, cada método se aplica según el objetivo de la valoración, los parámetros involucrados en el cálculo y las decisiones que tomarán las partes interesadas en la gestión.

Por otra parte, según el tipo de valor considerado (la forma más común de clasificación) se pueden distinguir tres grandes grupos: métodos basados en los costos, métodos basados en beneficios y métodos basados en el valor de mercado. A continuación, se sintetizan algunos métodos para cada grupo.

#### I. Métodos basados en los costos

Basado en el costo de reemplazo o de construcción (histórico) de la infraestructura, donde también se considera la vida útil y/o la condición actual del activo. Existe una subclasificación de este enfoque en 4 metodologías: métodos de depreciación, enfoques modificados, otros métodos tradicionales, y nuevos métodos propuestos (Dojutrek et al., 2012).

##### a) Métodos de depreciación

Este enfoque considera el costo original del activo y aplica diferentes formas de depreciación durante su vida útil. Algunas formas son: depreciación lineal, método de suma de dígitos, depreciación sigmoideal, entre otros. A continuación, se ejemplifican algunos métodos:

##### Depreciación lineal

Este método supone que los activos pierden un valor fijo cada año. Esta pérdida anual o tasa de depreciación constante, se calcula con el costo histórico y el valor residual. El valor del activo se obtiene mediante la Ecuación 1.1.1.

$$V_t = P - \frac{P - S}{t_s - t_p} \cdot (t - t_p) \quad (1.1.1)$$

Donde:

$V_t$  : Valor del activo al final de cualquier año “t”.

$P$  : Costo histórico de construcción.

$S$  : Valor residual del activo.

$t_p$  : Año de construcción.

$t_s - t_p$  : Vida útil.

**Método de suma de dígitos**

Este método deprecia los activos en forma acelerada, en el cual la depreciación es mayor en los primeros años de vida del activo, disminuyendo en los años subsecuentes. El valor del activo se obtiene mediante la Ecuación 1.1.2.

$$V_t = P - \left[ \frac{N - t + 1}{(N/2)(N + 1)} \right] \cdot (P - S) \tag{1.1.2}$$

Donde:

$N$  : Vida útil.

$N - t + 1$  : Vida útil restante al comienzo del año “t”.

Los otros parámetros representan lo mismo que en el caso anterior.

**Depreciación sigmoïdal**

Este método permite ajustar la tasa de depreciación, en donde el activo se deprecia a una baja tasa al inicio y al final de su vida útil, mientras que por la vida media presenta una mayor tasa. El valor del activo se obtiene mediante la Ecuación 1.1.3.

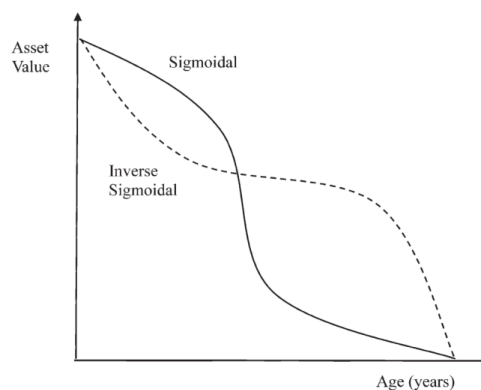
$$V_t = P - \left[ \frac{A}{B + C \cdot t^D} \right] \tag{1.1.3}$$

Donde:

$A, B, C, D$  : Coeficientes calibrados para un activo específico.

Los otros parámetros fueron definidos previamente.

También existe la forma sigmoïdal inversa, donde el activo se deprecia con mayor rapidez en los primeros y últimos años de vida útil. Ambas curvas se visualizan en la Figura 1.1.1.



**Figura 1.1.1:** Ilustración conceptual del método de depreciación sigmoïdal y sigmoïdal inverso.

Fuente: Dojutrek et al., (2012).

**b) Enfoque modificado**

Consiste en métodos alternativos que contemplan la condición del activo y su costo original. Estos métodos no consideran la depreciación explícitamente y requieren tener un sistema de gestión que identifique la condición de los activos y que ayude a garantizar el mantenimiento oportuno de estos.

**The Written-Down Replacement Cost Method**

Este método se calcula con el costo de construcción y una relación de condición, como se muestra en la Ecuación 1.1.4. La relación de condición representa la condición actual con respecto a la mejor condición que puede presentar el activo. Este método requiere de modelos de desempeño que predigan la condición del activo en cualquier momento.

$$V_t = HC \cdot \left( \frac{P_t}{P_{best}} \right) \quad (1.1.4)$$

Donde:

$V_t$  : Valor del activo en el tiempo “t”.

$HC$  : Costo de construcción.

$P_t$  : Condición del activo en el tiempo “t”.

$P_{best}$  : Mejor condición posible del activo.

**Método del valor ajustado con respecto a la condición límite**

Este método es similar al anterior, sin embargo, considera una condición límite para el activo, definida como “peor condición”. La Ecuación 1.1.5 representa el cálculo del valor del activo mediante este método.

$$V_t = HC \cdot \left( \frac{P_t - P_{worst}}{P_{best} - P_{worst}} \right) \quad (1.1.5)$$

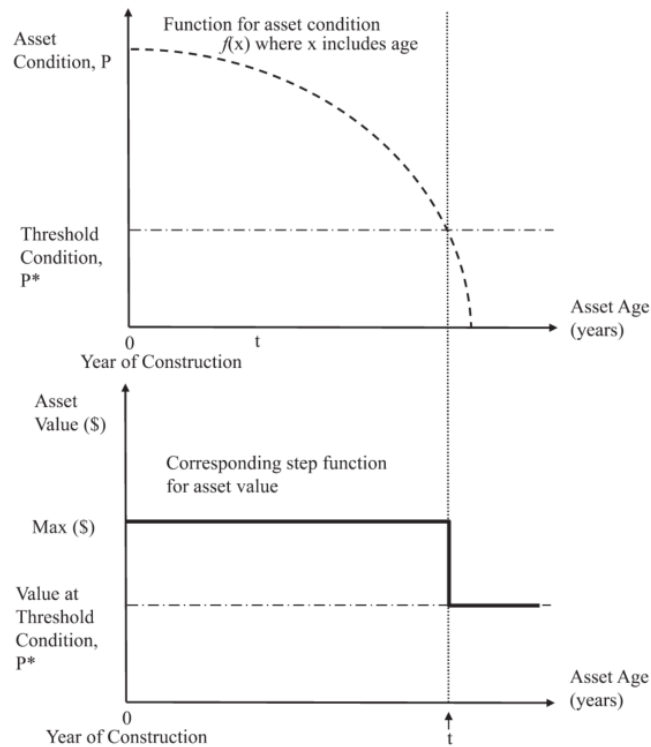
Donde:

$P_{worst}$  : Peor condición posible del activo.

El resto de los parámetros son similares al método anterior.

### **Método del valor fijo con respecto a la condición límite**

Este método considera el valor del activo constante durante su vida útil, siempre que su condición no supere un umbral de desempeño mínimo establecido para el activo. Cuando este umbral es sobrepasado, el valor del activo es igual a cero o un valor predefinido. La Figura 1.1.2 refleja este método de valoración.



**Figura 1.1.2:** Ilustración conceptual del método de valor fijo con respecto a la condición límite.

Fuente: Dojutrek et al., (2012).

### **c) Otros métodos tradicionales**

Estos métodos son ampliamente desarrollados en la literatura, pero no clasifican en los métodos anteriores. Su formulación depende netamente del costo que incurrió o debe incurrir una agencia en los activos evaluados, ya sea en construcción, rehabilitación o reemplazo del activo. Pueden o no depender de la condición actual del activo.

### **Valor neto residual**

En este método el valor del activo se calcula como la diferencia entre el costo de reemplazo y el costo necesario en el tiempo “t” para actualizarlo a un estado “como nuevo”. Puede considerarse como un enfoque de depreciación debido a que supone que el costo de rehabilitación aumenta a medida que el activo se deprecia, aunque no considera una tasa de depreciación como tal. El valor del activo se calcula con la Ecuación 1.1.6.

$$NSV_t = RC - RehabC_t \tag{1.1.6}$$

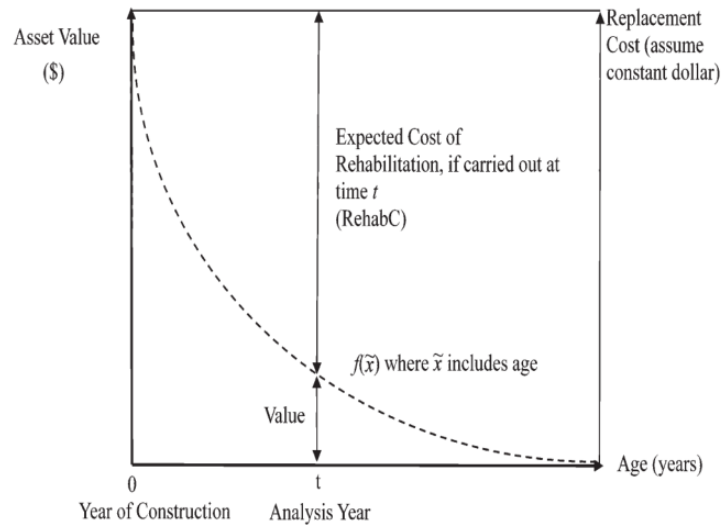
Donde:

$NSV_t$  : Valor del activo en el año “t”.

$RC$  : Costo de reemplazo o costo histórico.

$RehabC_t$  : Costo esperado de rehabilitación en el año “t”.

La Figura 1.1.3 demuestra cómo el costo de rehabilitación puede aumentar con el tiempo, sustentando este método de valoración. A medida que el valor del activo disminuye debido a los deterioros, se requieren más recursos para restaurar su valor original.



**Figura 1.1.3:** Ilustración conceptual del método de valor neto residual.

Fuente: Dojutrek et al., (2012).

**Costo histórico y costo histórico ajustado**

Estos métodos se basan en el costo histórico de construcción del activo y la única diferencia radica en la actualización por inflación en el precio. El valor del activo se calcula con la Ecuación 1.1.7 y con la Ecuación 1.1.8 para cada método, respectivamente.

$$V_t = HC \tag{1.1.7}$$

$$V_t = HC \cdot \left( \frac{CPI_t}{CPI_0} \right) \tag{1.1.8}$$

Donde:

$V_t$  : Valor del activo en el año “t”.

$HC$  : Costo histórico de construcción.

$CPI_t$  : Índice de precios de construcción en el año “t”.

$CPI_0$  : Índice de precios en el año de construcción.

### **Costo de reemplazo**

Este método depende del costo de reemplazo total del activo en el año de evaluación y se calcula con la Ecuación 1.1.9.

$$V_t = RC_t \quad (1.1.9)$$

Donde:

$V_t$  : Valor del activo en el año “t”.

$RC_t$  : Costo de reemplazo del activo en el año “t”.

### **d) Nuevos métodos propuestos**

En 2012, el Departamento de Transporte de Indiana (INDOT) realizó el estudio “A Methodology for Highway Asset Valuation In Indiana” (Dojutrek et al., 2012) para determinar el valor de los activos viales en la red de carreteras estatales. En este estudio se revisa la literatura existente sobre las prácticas de valoración a la fecha, discutiendo los enfoques y metodologías para cada uno. Estos métodos fueron sintetizados previamente.

Luego de la revisión, el estudio se enfoca en desarrollar y demostrar métodos de valoración propuestos que aborden las limitaciones de las prácticas tradicionales. Finalmente, se determinaron los valores de caminos y puentes para la red de carreteras estatales de Indiana con las metodologías tradicionales y las propuestas en el estudio.

A continuación, se revisarán los métodos propuestos por INDOT para la valoración de activos viales que tienen un enfoque de costos.

### **Descomposición elemental y multicriterios (EDMC)**

Este método trata de abordar la problemática de considerar los activos como estructuras monolíticas (métodos tradicionales), dado que cada componente de un activo puede deteriorarse a una tasa diferente, y por tanto, deben considerarse para tener un valor más representativo. Es por esto, que la ecuación presentada puede aplicarse a cada uno de los componentes de un activo, para luego obtener el valor total sumando los aportes individuales.

Otro aspecto que trata de abordar este método es reflejar el valor de un activo en términos de la vida útil, que es de interés para las agencias y de la condición, que es la preocupación por parte de los usuarios. Esta limitante se soluciona integrando importancias relativas a la perspectiva por parte de los usuarios y de las agencias en la valoración del activo.

La Ecuación 1.1.10 representa el enfoque que propone el método EDMC.

$$V_t = \left[ w_u \cdot \left( Cost \cdot \left( \frac{P_t - P_{worst}}{P_{best} - P_{worst}} \right) \right) + w_a \cdot \left( Cost \cdot \left( \frac{RSL_t}{SL} \right) \right) \right] \quad (1.1.10)$$

Donde:

- $V_t$  : Valor del activo en el tiempo “t”.
- $w_u$  : Importancia relativa de la condición del activo (perspectiva del usuario).
- $w_a$  : Importancia relativa de la vida útil restante del activo (perspectiva de la agencia).
- $Cost$  : Costo histórico o costo de reemplazo del activo.
- $P_t$  : Condición del activo en el tiempo “t”.
- $P_{best}$  : Mejor condición posible del activo.
- $P_{worst}$  : Peor condición posible del activo.
- $RSL_t$  : Vida útil restante en el tiempo “t”.
- $SL$  : Vida útil del activo.

### **Método de valoración probabilista**

El método de valoración probabilista se fundamenta en el hecho de que los activos de carreteras se comportan estocásticamente, incorporando rangos en lugar de cantidades fijas, a los parámetros de entrada como el costo de reemplazo, la condición y la vida útil restante.

Este enfoque valora los activos relacionándolos con la probabilidad de que sobrevivan hasta un tiempo “t” si no han fallado a partir del tiempo “t-1”. El valor del activo se calcula como el producto de dicha probabilidad y el costo de reemplazo del activo.

Para poder emplear este método es necesario contar con modelos de duración o curvas de supervivencia para los activos. La curva tipo Weibull es una de las distribuciones más utilizadas en modelos de duración paramétricas.

En la Ecuación 1.1.11 se presenta la probabilidad Weibull propuesta según el estudio, esta debe ser definida para cada activo en función de su comportamiento.

$$y_t = e^{-1 \cdot \left( \frac{t}{e^{b_1 X_1 + \dots + b_n X_n}} \right)^\beta} \quad (1.1.11)$$

Donde:

$y_t$  : Probabilidad de que la vida del activo es mayor o igual al tiempo “t”.

$\beta$  : Factor de forma.

$b_1, \dots, b_n$  : Coeficientes de calibración.

$X_1, \dots, X_n$  : Variables explicativas.

Por tanto, el valor del activo se obtiene con la Ecuación 1.1.12:

$$V_t = (RC) \cdot e^{-1 \cdot \left( \frac{t}{e^{b_1 X_1 + \dots + b_n X_n}} \right)^\beta} \quad (1.1.12)$$

Donde:

$V_t$  : Valor del activo en el tiempo “t”.

$RC$  : Costo de reemplazo del activo.

## II. Métodos basados en beneficios

Está basado en el beneficio económico que trae un activo en su vida de servicio. Son técnicas basadas netamente en la productividad, considerando tiempos de viaje, nivel de tránsito y actividad de la zona. La evaluación económica se utiliza como respaldo para la toma de decisiones financieras e incluye todos los costos que deben incurrirse para reemplazar el activo, por ejemplo, el método RDS.

### Método de reemplazo, tiempo inactivo y recuperación (RDS)

Este método se basa en la premisa de que un activo puede valorarse en cualquier momento sobre la base de los costos que se evitan al no tener que reemplazarlo. No se considera la condición del activo porque el escenario involucra el reemplazo total (Dojutrek et al., 2012).

Este método refleja no solo los costos de reemplazo, sino también, el costo por los inconvenientes para los usuarios cuando no se encuentran disponibles los activos; incluye además, los costos y beneficios que puede conllevar el reciclaje o eliminación de algunos componentes.

La Ecuación 1.1.13 representa el método RDS.

$$V_t = RC + (V_{t,ttc} + V_{t,VOC}) + V_{t,DISP} - V_{t,SALV} \quad (1.1.13)$$

Donde:

$V_t$  : Valor del activo en el tiempo “t”.

$RC$  : Costo de reemplazo del activo.

$V_{t,ttc}$  : Valor asociado con el tiempo de viaje del usuario al no reconstruir el activo.

$V_{t,VOC}$  : Valor asociado con el costo operativo del vehículo al no reconstruir el activo.

$V_{t,DISP}$  : Valor asociado al costo de reciclaje/eliminación.

$V_{t,SALV}$  : Valor asociado al beneficio del reciclaje/eliminación.

Por otra parte, se tiene el trabajo de tesis de Stone (Stone, 2014) donde se establece un marco metodológico para cuantificar el valor económico de las carreteras existentes, donde se consideran los impactos directos e indirectos. Dentro de los impactos directos se encuentran los tiempos ahorrados de viajes, el valor del tiempo ahorrado, los costos de operación del vehículo y el costo ambiental. Por el contrario, los impactos indirectos corresponden a la conectividad, bienes y servicios, negocios aledaños a la carretera, aumento de empleo, producción a gran escala y turismo, entre otros.

La formulación para calcular el valor de los activos se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Economic value} &= (\text{Time Savings}_{pv}) * (\text{VOT}_{pv} + \text{VOC}_{pv} + \text{EC}_{pv}) \\
 &+ (\text{Time Savings}_t) * (\text{VOT}_t + \text{VOC}_t + \text{EC}_t) \\
 &+ c_T * (\text{Truck Flow}) \sum_{i=1}^n (P) i \left( \frac{\text{Tons}}{\text{Truck}} \right) i \left( \frac{\$}{\text{Ton}} \right) i \\
 &+ c_R * \sum_{j=1}^m (\# \text{of roadside businesses}) j (\$/\text{business}) j \\
 &+ c_E * \left( \frac{\text{VMT}}{\text{Total VMT}} \right) (\text{OE}) * (\text{Average Salary})
 \end{aligned}$$

(1.1.14)

Donde:

$EconomicValue$  : Valor económico de la carretera en el tiempo “t”.

$TimeSavings$  : Tiempo ahorrado.

$VOT$  : Valor del tiempo.

$VOC$  : Valor del costo operativo del vehículo.

$EC$  : Valor de costos ambientales.

- $c_T$  : Coeficiente asociado a camiones.
- $(P)_i$  : Porcentaje de camiones del  $i$ -ésimo sector industrial.
- $c_R$  : Coeficiente asociado a negocios aledaños a la carretera.
- $c_E$  : Coeficiente asociado al empleo.
- $OE$  : Empleo general.
- $p, v, t$  : Sub-índices que corresponden a vehículos de pasajeros y camiones, respectivamente.

### **Enfoque de costos y beneficios (enfoque de utilidad)**

Está basado tanto en los costos como en el impacto económico al considerar medidas de desempeño para tres factores clave: condición física, funcionalidad y utilización general de los activos. Cada uno de estos factores se caracteriza por indicadores apropiados que pueden cuantificarse. Este método combina el costo de reemplazo como valor base y los indicadores de desempeño asignado por una función de utilidad (exponencial o sigmoïdal, y de forma creciente o decreciente).

Un ejemplo de este enfoque se expone en el trabajo desarrollado por Diniece Peters y Zhanming Zhang (Peters & Zhang, 2014) donde la formulación para calcular el valor de los activos se presenta a continuación:

$$U_{PC} = \sum_{i=1}^m k_i [u(PM_{PC_i}^*)]; \quad U_{FY} = \sum_{i=1}^n k_i [u(PM_{FY_i}^*)]; \quad U_{UZ} = \sum_{i=1}^q k_i [u(PM_{UZ_i}^*)]$$

$$U_{total} = k_{PC}U_{PC} + k_{FY}U_{FY} + k_{UZ}U_{UZ} \quad (1.1.15)$$

$$V_t = CR_t(U_{total} + 1)$$

Donde:

- $U$  : Utilidad del activo en términos de condición física, funcionalidad o utilización general.
- $PC, FY, UZ$  : Sub-índices que corresponden a condición física, funcionalidad y utilización general, respectivamente.
- $m, n, q$  : Número de medidas de desempeño asociadas a los factores claves anteriores.
- $k$  : Coeficiente de peso.
- $U_{total}$  : Utilidad total del activo de carretera.
- $V_t$  : Valor total del activo en el año “t”.
- $CR$  : Costo de reemplazo del activo en el año “t”.

En la Tabla 1.1.1 se muestran algunos indicadores para los distintos factores claves propuestos en este estudio.

**Tabla 1.1.1:** *Potenciales indicadores para factores claves (Peters & Zhang, 2014).*

Key Factors	Potential Indicators	Potential Performance Measures
Functionality	Physical Condition Structural Capacity & Surface Condition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• International Roughness Index (IRI)</li> <li>• Pavement Serviceability Index (PSI),</li> <li>• Condition Score (CS)</li> <li>• Ride Score (RS) &amp; Distress Score (DS)</li> <li>• Skid Number (SK)</li> </ul>
	Safety	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Number of traffic fatalities</li> <li>• Number of serious injuries in traffic crashes (State crash data files)</li> <li>• Fatalities/VMT or Injuries/VMT</li> <li>• Response time to Incidents</li> <li>• Number of accidents per VMT, per year, per trip, per ton-mile, and per capita</li> <li>• Number of locations with high crash rates or hazard indexes (exceeding defined threshold)</li> </ul>
	Mobility	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Average Travel Speed (mph)</li> <li>• Travel Rate (minutes/mile)</li> <li>• Delay Rate (minutes per mile)</li> <li>• Delay Ratio</li> <li>• Corridor Mobility Index</li> </ul>
	Accessibility	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Average trip length</li> <li>• Travel Time Index (Urban Freeways)</li> <li>• Connectivity to Intermodal Facilities</li> <li>• Percent of employment sites within x miles of highway or a reasonable travel time</li> <li>• Average travel time to major regional destinations</li> </ul>
Utilization	Capacity Utilization	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traffic Intensity (AADT/Capacity Ratio)</li> <li>• Volume/Capacity Ratio</li> <li>• AADT (Annual Average Daily Traffic)</li> <li>• Persons miles traveled</li> <li>• Persons, Trucks, or Vehicles Moved</li> </ul>
Sources: [Cambridge Systematics, 2006; Meyer & Miller, 2001; Garber & Hoel, 2009]		

### III. Métodos basados en el valor de mercado

Es un enfoque relacionado con el precio que un comprador está dispuesto a pagar por un activo, por ejemplo, el método D&R. Si bien existe como enfoque de valoración, no es usual en la valoración de activos viales.

#### Desmantelamiento y reutilización (D&R)

Este enfoque de valoración se determina en función del terreno de tierra que ocupa el activo, donde es necesario conocer el precio unitario del terreno y el área abarcante por el activo (Dojutrek et al., 2012).

El método D&R está fundado en la posible reubicación de los activos para utilizar el espacio en otros fines, incluido el desarrollo comercial, áreas recreativas, tierras de cultivo o espacios verdes.

### 1.1.2. Métodos empleados actualmente en la valoración de activos viales

Actualmente existen varios países que realizan una valoración de sus activos viales. En la Tabla 1.1.2, se muestra el resultado de la experiencia internacional presentada según el estudio “Metodología para la determinación del Patrimonio Vial” (MOP, 2015).

**Tabla 1.1.2:** *Experiencia internacional en valoración de activos viales (MOP, 2015).*

Pais	Método de valoración	Activos viales considerados	Información requerida
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GASB 34</li> <li>• Enfoques de depreciación</li> <li>• Enfoques modificados por umbral de condición</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terreno</li> <li>• Caminos</li> <li>• Puentes</li> <li>• Túneles</li> <li>• Obras de saneamiento</li> <li>• Elementos de seguridad</li> <li>• Señalética</li> <li>• Luminaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventario de activos</li> <li>• Costo histórico de construcción</li> <li>• Inversiones de conservación/rehabilitación</li> <li>• Modelos de deterioro</li> </ul>
Canadá	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo histórico</li> <li>• Depreciación lineal</li> <li>• Valoración total del activo o por componentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caminos</li> <li>• Puentes</li> <li>• Obras de saneamiento</li> <li>• Elementos de seguridad</li> <li>• Señalética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventario de activos</li> <li>• Costo histórico de construcción</li> <li>• Inversiones de conservación</li> <li>• Vida de servicio</li> <li>• Clasificación de estado de los activos</li> </ul>
Australia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AASB</li> <li>• Valor actual</li> <li>• Depreciación lineal</li> <li>• Depreciación basada en la condición</li> <li>• Revisión/actualización periódica del valor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terreno</li> <li>• Caminos</li> <li>• Puentes</li> <li>• Obras de saneamiento</li> <li>• Elementos de seguridad</li> <li>• Señalética</li> <li>• Luminarias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventario de activos</li> <li>• Año de construcción</li> <li>• Costo histórico de construcción</li> <li>• Valor actual (costo de reemplazo)</li> <li>• Vida útil (económica y física)</li> <li>• Valor residual</li> </ul>
Chile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CEPAL</li> <li>• Valor de salvamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caminos</li> <li>• Puentes</li> <li>• Túneles</li> <li>• Ciclovías y pasarelas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventario de activos</li> <li>• Costo de construcción camino nuevo</li> <li>• Costo de conservación/rehabilitación</li> <li>• Clasificación de estado de los caminos</li> </ul>

De la Tabla 1.1.2 se desprende que Estados Unidos, Canadá y Australia emplean algún enfoque de depreciación como método de valoración. Además, se observa que consideran dentro de su evaluación, activos viales como señales verticales, elementos de seguridad y luminarias. En el caso de Chile, se emplea como enfoque de valoración la metodología propuesta por CEPAL (1994) y el valor de salvamento.

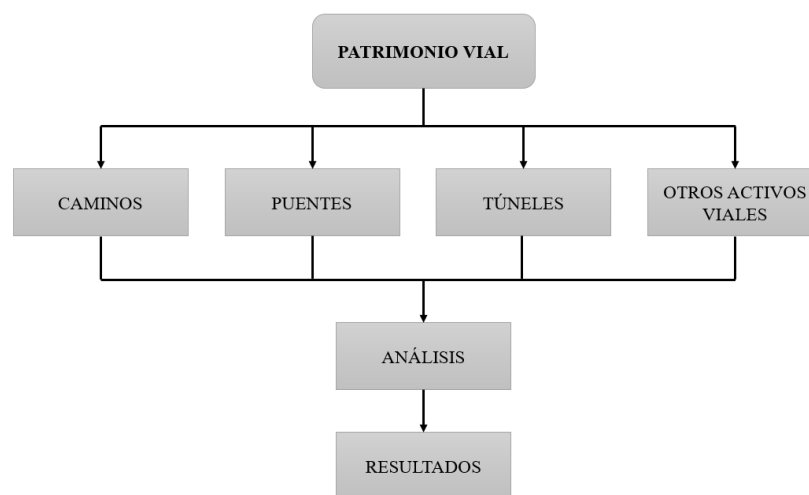
Según el estudio, en Colombia también se adopta la metodología propuesta por CEPAL para la valoración de activos. En Bélgica se recomienda utilizar un enfoque basado en el costo de reemplazo, considerando una depreciación basada en el estado del camino. En Reino Unido se recomienda que la red vial debe ser valorada de acuerdo con el costo de reemplazo actual, considerando una depreciación que refleje el estado general de la red.

Finalmente, se puede concluir que a pesar del amplio desarrollo de métodos de valoración, los métodos tradicionales de depreciación siguen siendo los más utilizados en varios países.

### 1.1.3. Metodología para determinar el valor del Patrimonio Vial en Chile

La metodología actual para determinar el valor del Patrimonio Vial en Chile está basada en las adaptaciones realizadas por Almonte, L. (1999) y Fernández, S. (2002), cuyos fundamentos fueron propuestos por Schliessler y Bull (1994) a través de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Esta adaptación se realizó en función de las características de los caminos y de la información disponible por la Dirección de Vialidad (DV) del Ministerio de Obras Públicas, organismo encargado de la administración y conservación de la Red Vial Nacional.

En la determinación del Patrimonio Vial se incluye la valorización de los activos que se presentan en la Figura 1.1.4.



**Figura 1.1.4:** Esquema general de los activos para el cálculo del Patrimonio Vial en Chile.

*Fuente: MOP (2016-b).*

Para esta valoración se consideran caminos pavimentados, soluciones básicas y caminos no pavimentados. Además, se incluyen puentes, túneles, ciclovías y pasarelas.

Para el cálculo del valor patrimonial de caminos se necesitan tres tipos de datos:

1. Información de sectorización e inventario, tal como longitudes, características físicas, volumen aproximado de tránsito diario, entre otras.
2. Información relativa al costo de construcción de un camino nuevo y al costo de diversos trabajos de mantenimiento y conservación.
3. Información con respecto al estado actual de los caminos y las necesidades de conservación.

Para el caso de puentes, túneles y otros activos viales, se requiere de dos tipos de datos principalmente:

1. Información de inventario, tal como ubicación y características físicas que tiene el activo.
2. Información relativa al costo histórico de construcción, vida útil y valor de salvamento de los activos.

A continuación, será presentado el método de valoración para los caminos pavimentados descrito en el Estudio Básico: “Metodología para la determinación del Patrimonio Vial” (MOP, 2016-b) y que forma parte de la metodología de valoración para la Red Vial Nacional de Chile (caminos no concesionados).

Para los caminos pavimentados cuya carpeta de rodadura este conformada por mezcla asfáltica, losas de hormigón o tratamiento superficial, se determina el valor en función del estado actual, utilizando el valor neto residual como método de valoración. El cálculo del valor activo se visualiza en la Ecuación 1.1.16:

$$V_c = CN - C_{Rehab_t} \quad (1.1.16)$$

Donde:

$V_c$  : Valor del camino en el momento de la evaluación del Patrimonio Vial.

$CN$  : Costo de camino nuevo (Costo de reemplazo).

$C_{Rehab_t}$  : Costo necesario para llevar al activo a la condición inicial “como nuevo” en el tiempo “t”.

El costo del camino “nuevo” está en función del Inventario Vial de Caminos Pavimentados y de la base de datos con costos de camino nuevo asociado a cada categoría, mientras que el costo de rehabilitación depende del Índice de Condición del Pavimento (ICP) y de la acción de conservación que fue asignada según la metodología.

De la formulación anterior se puede deducir que a través de una rehabilitación en el pavimento, siempre se puede volver a un estado “como nuevo”.

### **Índice de Condición del Pavimento**

El Índice de Condición del Pavimento es un indicador del estado del pavimento según los grados de deterioros estructurales y funcionales que presenta. Se calcula mediante una ecuación de regresión y se diferencia para pavimentos asfálticos, pavimentos de hormigón y tratamientos superficiales.

El ICP tiene una calificación numérica (de 10.0 a 1.0) dependiendo del tipo de camino evaluado, a la cual se le asigna una calificación categórica (“muy bueno”, “bueno”, “regular”, “malo” y “muy malo”).

**Asignación de las acciones de conservación**

En el año 2020, el Departamento de Gestión Vial de la Dirección de Vialidad, actualiza el informe Proposiciones de Acciones de Mantenimiento (PAM), en el cual se presenta la metodología de asignación de acciones de conservación recomendadas para los distintos tipos de pavimentos, las cuales se agrupan en conservaciones rutinarias, periódicas y mayores. Por ejemplo, para los pavimentos asfálticos (mezclas asfálticas y dobles tratamientos), las acciones de conservación se detallan en la Tabla 1.1.3:

**Tabla 1.1.3:** Acciones de conservación para pavimentos asfálticos (MOP, 2020-b).

Tipo de Conservación	Acciones de conservación
Rutinaria	Limpieza de Faja y Saneamiento
	Sello de grietas
	Bacheo
Periódica	Riego Neblina
	Sellos asfálticos: Lechadas Asfálticas, Sellos de agregados
	Fresado y reemplazo
	Recapado delgado (Funcional)
Mayor	Recapado estructural
	Reciclado
	Reconstrucción

La metodología se basa en “árboles de decisión” que permite que los deterioros se encuentren dentro de valores preestablecidos. Se entiende por umbral de intervención, aquellos límites a partir de los cuales se debe materializar alguna acción de conservación con el fin de asegurar la comodidad y seguridad a los usuarios. Como ejemplo, se presentan los límites para pavimentos asfálticos en la Tabla 1.1.4 :

**Tabla 1.1.4:** Límites de intervención para pavimentos asfálticos (MOP, 2004).

Umbrales para Pavimentos Asfálticos															
Tránsito	Alto (>3000)					Medio (3000 a 1200)					Bajo (<1200)				
Deterioro	Baches (%)	IRI (m/km)	Grietas (%)	Ahuell. (mm)	Exuda. (%)	Baches (%)	IRI (m/km)	Grietas (%)	Ahuell. (mm)	Exuda. (%)	Baches (%)	IRI (m/km)	Grietas (%)	Ahuell. (mm)	Exuda. (%)
Seco	>2,0	>7,0	>60	>10	>30	>2,0	>8,0	>60	>15	>40	>2,5	>8,5	>60	>20	>50
	<2,0	5,5 a 7,0	20 a 60	<10	<30	<2,0	6,0 a 8,0	30 a 60	<15	<40	<2,5	6,5 a 8,5	40 a 60	<20	<50
	-	3,5 a 5,5	<20	-	-	-	4,0 a 6,0	<30	-	-	-	4,5 a 6,5	<40	-	-
Semi Húmedo	>2,0	>7,0	>50	>10	>30	>2,0	>8,0	>50	>15	>40	>2,5	>8,5	>50	>20	>50
	<2,0	5,5 a 7,0	20 a 50	<10	<30	<2,0	6,0 a 8,0	20 a 50	<15	<40	<2,5	6,5 a 8,5	30 a 50	<20	<50
	-	3,5 a 5,5	<20	-	-	-	4,0 a 6,0	<20	-	-	-	4,5 a 6,5	<30	-	-
Húmedo	>1,5	>7,0	>40	>10	>30	>1,5	>8,0	>40	>15	>40	>2,0	>8,5	>40	>20	>50
	<1,5	5,5 a 7,0	20 a 40	<10	<30	<1,5	6,0 a 8,0	20 a 40	<15	<40	<2,0	6,5 a 8,5	30 a 40	<20	<50
	-	3,5 a 5,5	<20	-	-	-	4,0 a 6,0	<20	-	-	-	4,5 a 6,5	<30	-	-
	-	<3,5	-	-	-	-	<4,0	-	-	-	-	<4,5	-	-	-

Nota: Los valores en % se refieren a la relación entre el área afectada por el deterioro y el total del área muestral.

A continuación, se presenta el árbol de decisión para pavimentos de mezclas asfálticas (Figura 1.1.5). Los límites de intervención son los definidos en la Tabla 1.1.4.

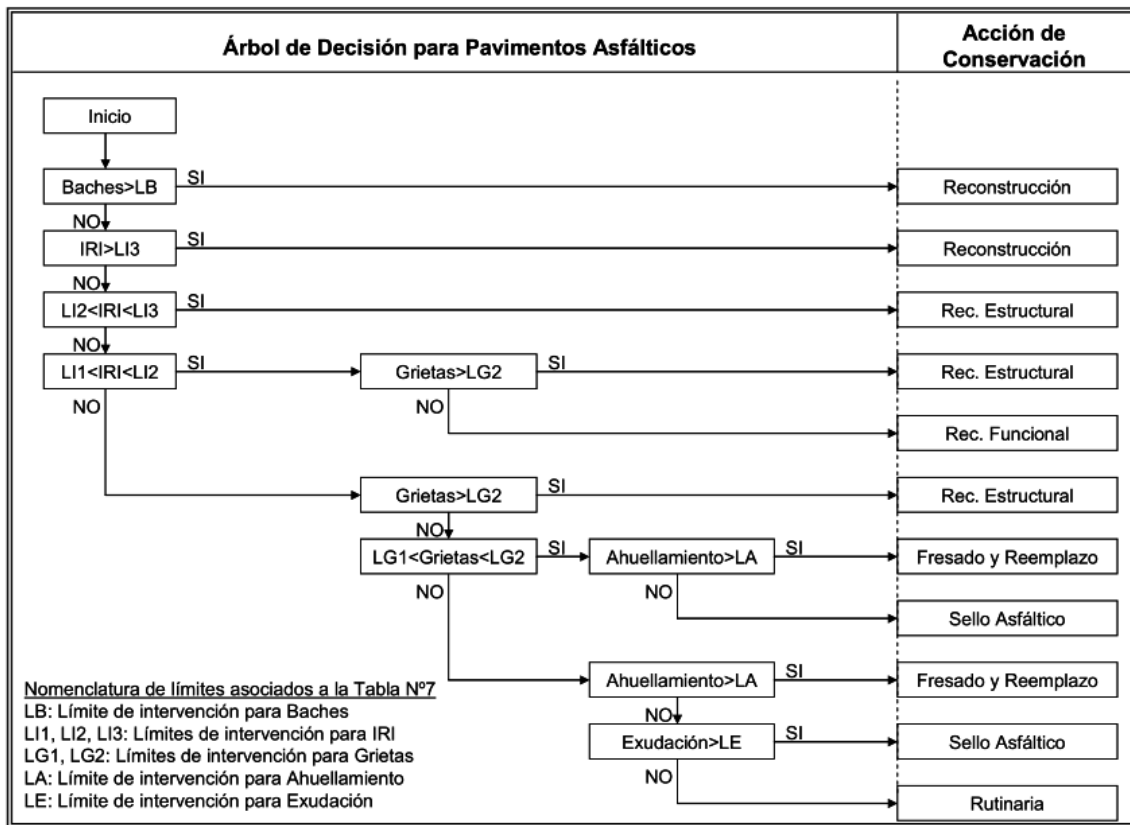


Figura 1.1.5: Árbol de decisión para asignación de acciones de conservación en pavimentos asfálticos.

Fuente: MOP (2004).

La Dirección de Vialidad tiene definida las acciones de conservación según el tipo de actividad y su descripción; de igual manera, tiene tabulados los precios unitarios de cada una de estas actividades según la zona geográfica del país (zona norte, centro, sur y austral).

En base a los límites de intervención, es posible determinar la acción de conservación necesaria para llevar al camino a su condición “como nuevo”. Una vez definida la acción, se calcula su costo y luego se obtiene el valor del activo, aplicando la Ecuación 1.1.16.

Esta metodología es aplicable tanto para pavimentos asfálticos, pavimentos de hormigón y tratamientos superficiales, donde cada uno de ellos tiene definidos límites de intervención y árboles de decisión propios.

A partir de la información presentada, para el cálculo del valor de los pavimentos asfálticos de carreteras interurbanas concesionadas se requieren tres tipos de datos:

1. Información del inventario de la carretera, sus dimensiones y las características físicas que la definen.
2. Información de la condición actual del pavimento, en este caso, correspondiente a los indicadores técnicos desarrollados para calcular el Nivel de Servicio.
3. Información relativa al costo de construcción o costo histórico del pavimento y el costo de diversas actividades de conservación.

Dado que este método se implementará en proyectos concesionados, esta información es de fácil acceso, ya que se encuentra como parte de los requerimientos de las bases de licitación, tal como se puede distinguir en los contratos más actuales (MOP, 2019-a; MOP, 2021).

La información con respecto al inventario de la carretera se encuentra en el Sistema BIM o BIM (Building Information Modeling). El BIM está destinado a que el concesionario gestione el diseño, construcción y conservación de las obras de infraestructura exigidas en las bases de licitación, incluyendo todos los elementos de la concesión: infraestructura, equipamiento, instalaciones, elementos o activos viales. Para el pavimento, se recomienda que la información sea lo más detallada posible en cuanto materiales, espesores, longitudes y ubicación. Mientras más detallada y específica sea la información de inventario, más preciso y exacto será el cálculo del costo histórico del pavimento.

Con respecto a la información de la condición actual del pavimento, el concesionario debe contar con el Sistema de Información para la Constatación de los Niveles de Servicio (SIC-NS). Los registros obtenidos de las mediciones realizadas por el inspector fiscal serán ingresados por él o su asesoría en la Bitácora que está definida como parte del SIC-NS, donde se registre las constataciones de los indicadores técnicos y su desempeño.

Por último, la información con respecto al costo de construcción o de actividades de conservación, pueden ser calculados a partir de los precios unitarios oficiales de la base de licitación (Anexo N°3). Estos precios son definidos en Unidades de Fomento (UF).

Un aspecto importante por considerar para la valoración de una carretera son los componentes que conforman el activo pavimento. En el estudio de valoración de la Red Vial Nacional (MOP, 2016-b), se definen los componentes de un camino, clasificación que se puede considerar también para las carreteras concesionadas. Los componentes se detallan a continuación:

- a. Terreno
- b. Obras básicas
- c. Capas de rodadura
- d. Estructuras mayores (puentes, túneles, muros, etc.)

**a. Terreno:** es el espacio físico en que se construye el camino. La adquisición del terreno es una transacción de carácter legal, que no incluye ningún tipo de obra civil. El terreno puede haber sido del Estado, y si no, este lo compra a propietario privados mediante expropiación; la adquisición es una transferencia y no supone cambio alguno en el valor del Patrimonio Nacional. En consecuencia, el terreno es parte del patrimonio general del país, pero no del Patrimonio Vial.

**b. Obras básicas:** constituyen la plataforma sobre la cual se construyen las capas de rodadura. Corresponden a los cortes de cerros, rellenos de quebradas, puentes, obras de drenaje y túneles construidos para salvar los obstáculos naturales o artificiales del terreno, asegurando que el camino tenga pendientes suaves, curvas amplias y buena visibilidad, entre otras características.

**c. Capas de rodadura:** permiten que la superficie del camino sea firme y plana, de modo que los vehículos puedan desplazarse en forma cómoda, segura y rápida. Para el caso de estudio esta será de asfalto o tratamiento asfáltico. Las capas inferiores pueden ser de diferentes materiales y espesores, y sirven para dar apoyo, firmeza y durabilidad a la superficie visible. El conjunto de capas suele ser la parte más costosa del camino, y la que más rápido se deteriora si no se efectúa una conservación adecuada.

**d. Estructuras mayores:** incluye puentes, túneles, viaductos, etc. Los puentes y viaductos se desgastan con el uso (fatiga de materiales) y necesitan ser reemplazados después de que un cierto número de vehículo ha hecho uso de ellos. La evaluación requiere de un cálculo independiente, donde la principal dificultad para asociarles un valor patrimonial radica en la gran diversidad de estructuras y sus fundaciones, así como también en su mecanismo de desvalorización.

En función de lo expuesto anteriormente, el valor patrimonial de una carretera con pavimento asfáltico se calcula como la suma de:

- i) Costo de obras básicas y;
- ii) Costo del pavimento (calzadas y bermas), incluyendo sus diferentes capas.

De acuerdo con el estudio, en la práctica el deterioro principal se produce en las diferentes capas de pavimento y en circunstancias normales, las obras básicas no presentan deterioros relevantes, es decir, con un mínimo de conservación estas mantienen su valor inicial. En el contexto de desarrollar un método para pavimentos asfálticos de carreteras concesionadas, tanto las obras básicas, bermas y estructuras, no serán consideradas, pero deben estudiarse para determinar si deben incluirse en un modelo general que evalúe toda la infraestructura de una concesión.

### 1.1.4. Enfoque de valoración del Patrimonio Vial en nuevos contratos de concesiones chilenas

Actualmente, las sociedades concesionarias viales en Chile deben cumplir con requerimientos mínimos según los contratos de licitación, dentro de los cuales se encuentran los Servicios de Conservación. Estos servicios se refuerzan mediante Planes de Conservación de las Obras y por Programas Anuales de Conservación, todos definidos según la Dirección General de Concesiones del Ministerio de Obras Públicas.

De la revisión de las bases de licitación de obras viales concesionadas más modernas, tales como:

- Concesión para el Mejoramiento de la Ruta G-21 (MOP, 2018).
- Segunda Concesión Ruta 5 Tramo Talca - Chillán (MOP, 2019-a)
- Concesión Ruta 5 Tramo Chacao - Chonchi (MOP, 2021)

Se desprende que los servicios de conservación, destinados a mantener las obras y asegurar un correcto funcionamiento, se definen de la siguiente manera:

- Conservación programada: Contiene las exigencias que debe cumplir el concesionario respecto a la conservación de ciertos elementos y cuyo incumplimiento dará origen al cobro de multas.
- Conservación por Niveles de Servicio: Se definen los estándares e indicadores de servicios para distintos componentes, considerando los servicios básicos y los servicios especiales obligatorios.

De igual forma, en el primer contrato donde se presenta una metodología de valorización (MOP, 2019-a), se establece un pago final que debe efectuar el MOP a la Sociedad Concesionaria cuando se cumpla que el valor del  $VPI_m$  supere el 98 % del monto del ITC o cuando falten 6 meses para la extinción del contrato, lo primero que ocurra.

El  $VPI_m$  corresponde al Valor Presente de los Ingresos de la Sociedad Concesionaria y el  $ITC$  se refiere a los Ingresos Totales de la Concesión ofertados por el Licitante en su oferta económica. La concesión se extinguirá cuando se cumpla que el  $VPI_m \geq ITC$  o 360 meses.

El monto del Pago Final (PF) se debe calcular como el mínimo en UF entre el Valor Residual de las obras de la concesión (VR) y el Valor Residual Máximo ( $VR_{máx}$ ), una vez ponderado por el Factor Técnico (FT), de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$PF = \text{mínimo}\{VR; VR_{Máx}\} \times FT$$

$$VR = \text{máximo}\{VR_{Base}; VR_{EP}\}$$

$$VR_{Base} = 5.810.000 \times \left(1 - \frac{m - mesPSP_{s1}}{600}\right) \times \alpha_1 + 3.970.000 \times \left(1 - \frac{m - mesPSP_{s2}}{600}\right) \times \alpha_2 + 6.140.000 \times \left(1 - \frac{m}{600}\right)$$

El  $VR_{EP}$  es el valor residual de las obras obtenido de los estudios de peritajes, donde se aplicará la metodología establecida en el Estudio Básico: “Metodología para la Determinación del Patrimonio Vial” de la Dirección de Vialidad. Estos métodos fueron descritos en la Sección 1.1.3.

$$VR_{Máx} = 5.810.000 \times \left(1 - \frac{m - mesPSP_{s1}}{840}\right) \times \alpha_1 + 3.970.000 \times \left(1 - \frac{m - mesPSP_{s2}}{840}\right) \times \alpha_2 + 6.140.000 \times \left(1 - \frac{m}{840}\right)$$

El Factor Técnico se estima de acuerdo con lo siguiente:

FT=1,0	Si $EE_{remanentes} \geq 69.400.000$
FT=( $EE_{remanentes}/73.000.000$ ) × 2 – 0,9	Si $51.100.000 < EE_{remanentes} < 69.400.000$
FT=0,5	Si $EE_{remanentes} < 51.100.000$

Donde:

- $m$  : Mes en que se cumple que  $VPI_m \geq 0,98ITC$  o cuando falten 6 meses para la extinción de la concesión, lo primero que ocurra.
- $mesPSP_{s1}$  : Mes de Puesta en Servicio Provisoria de las Obras del Sector 1.
- $mesPSP_{s2}$  : Mes de Puesta en Servicio Provisoria de las Obras del Sector 2.
- $\alpha_1$  : Tomará el valor de 1, si se cuenta con la autorización de la Puesta en Servicio Provisoria de las Obras del Sector 1. En caso contrario tomará el valor de 0.
- $\alpha_2$  : Tomará el valor de 1, si se cuenta con la autorización de la Puesta en Servicio Provisoria de las Obras del Sector 2. En caso contrario tomará el valor de 0.
- $EE_{remanentes}$  : Ejes equivalentes remanentes promedio en toda la concesión a partir de la última medición de Deflectometría de Impacto (FWD).

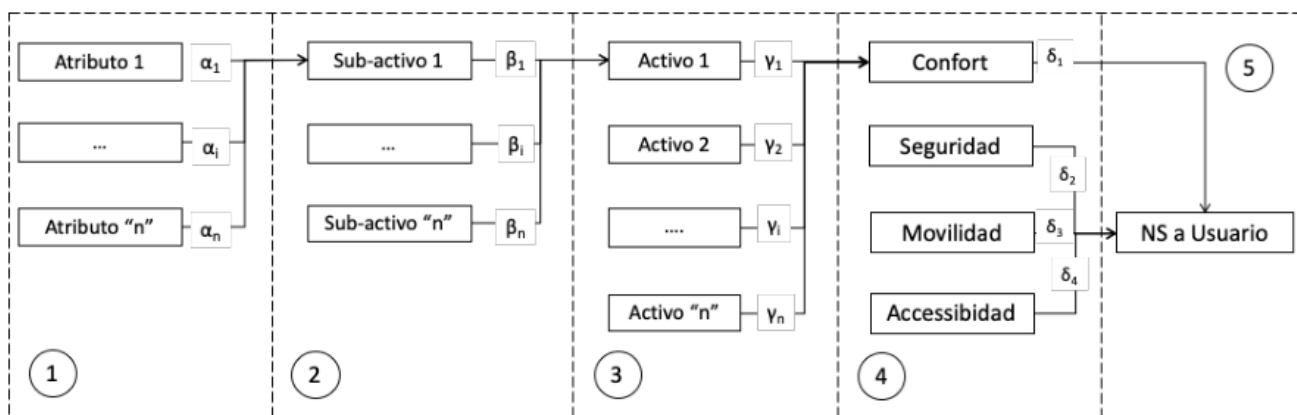
Las fórmulas presentadas anteriormente son particulares para el contrato Segunda Concesión Ruta 5 Tramo Talca - Chillán (MOP, 2019-a), pero la metodología de valoración es similar para el contrato Concesión Ruta 5 Tramo Chacao - Chonchi (MOP, 2021), donde se ajustan las magnitudes y factores para el proyecto.

## 1.2. Análisis comparativo de métodos de valoración

### 1.2.1. Contexto para elección de método

Para poder desarrollar un modelo de valorización del patrimonio que sea compatible con el nivel de servicio a los usuarios, se requiere haber definido previamente y de manera clara, cómo se mide el nivel de servicio que la infraestructura entrega a los usuarios de esta. Este trabajo ya fue realizado de manera exitosa en el proyecto FONDEF IT16I10008, titulado “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones” (Delgadillo et al., 2020).

El modelo desarrollado consistió en primer lugar, en la definición de los valores en juego relevantes para los usuarios, los que fueron agrupados en movilidad, seguridad, comodidad y accesibilidad. Luego, se determinó cuáles son las características de los activos que influyen en cada uno de esos valores en juego, para posteriormente, definir indicadores técnicos objetivos, metodologías de constatación y umbrales admisibles. Finalmente, se incorporó dentro de un modelo lineal la influencia de cada activo en la satisfacción del nivel de servicio, ponderando cada indicador de acuerdo con la importancia que tiene para la satisfacción del usuario. Este modelo será utilizado como base para la compatibilización del modelo de valorización del Patrimonio Vial a desarrollar. El esquema del modelo de Nivel de Servicio se muestra en la Figura 1.2.1.



**Figura 1.2.1:** Esquema del modelo de Nivel de Servicio.

Fuente: Delgadillo et al., (2020).

Para el desarrollo del modelo de valorización del Patrimonio Vial compatible con el modelo de Nivel de Servicio al usuario desarrollado previamente, se seleccionará el o los métodos apropiados de entre los métodos existentes. El modelo además debe permitir al Estado, a través de la Dirección General de Concesiones del Ministerio de Obras Públicas, evaluar la gestión del concesionario en la conservación del patrimonio vial durante la etapa de explotación.

Los activos viales que componen una concesión y que conforman el Patrimonio Vial son todos los elementos físicos que prestan un servicio de forma directa o indirecta a los usuarios, tales como, la vía expresa, calles de servicio, cortes, rellenos, estructuras a desnivel, túneles, puentes, trincheras, señalización, demarcación vial, edificios, plazas de peaje, pórticos y obras complementarias como bajadas de agua, cunetas, fosos y contrafosos, obras de arte transversales y longitudinales, paraderos, áreas de servicios, postes SOS y paisajismo, entre otros (MOP, 2019-a; MOP, 2021).

Dentro de estos activos, los que son usualmente considerados para el cálculo de Valor Patrimonial son caminos, puentes, túneles, obras de saneamiento, elementos de seguridad, señales verticales y luminarias, tal como se menciona en la Sección 1.1.2. En particular, este trabajo de tesis desarrollará un método que permita valorizar los pavimentos de materiales asfálticos, considerados el activo de mayor valor dentro de vías interurbanas de alto estándar, como el caso de las rutas concesionadas chilenas.

Es importante indicar que, dada la compatibilidad que se quiere realizar con el modelo de Nivel de Servicio, es necesario considerar la condición que tiene el pavimento por medio de los indicadores técnicos objetivos y los umbrales admisibles para una vía concesionada, trabajo ya realizado en el proyecto antes mencionado.

Por último, algunas características que debe considerar el método de valorización considerando el contexto de aplicación en bases de licitación, es que debe procurar no aumentar innecesariamente los riesgos de la licitación, por tanto, debe ser lo más objetivo posible de manera que no genere controversias que puedan resultar en litigaciones entre la concesionaria y el MOP. De la misma manera, la valorización de los activos debe quedar incorporada en el contrato desde el año en que se produce el llamado a licitación.

### 1.2.2. Análisis de métodos

Luego de revisar los distintos métodos de valoración, se presenta el siguiente análisis para determinar cuál es la forma más adecuada de valorizar los pavimentos asfálticos, y en general, los activos de carreteras interurbanas concesionadas en Chile, de acuerdo con el objetivo y contexto de estudio.

Los *métodos de depreciación* consideran a los activos como estructuras monolíticas y asumen una tasa de deterioro uniforme para todos los componentes. Sin embargo, cualquier activo de carretera consiste en múltiples componentes que pueden tener tasas de deterioro o depreciación diferentes, por tanto, no es una forma adecuada de valorar algunos activos viales. Este método es fácil de calcular ya que se necesitan parámetros generalmente disponibles, pero no contempla la condición actual y el servicio que puede estar prestando el activo, es por esto, que se considera como una opción válida en caso de no contar con modelos de deterioro y/o desempeño o indicadores de condición. Para estos métodos es importante tener bien definida la vida útil de los activos, ya que es un parámetro primordial en el cálculo.

En los métodos de depreciación, el activo tiene una vida útil fija, un valor residual predefinido y una curva de depreciación también asumida. Estos valores predefinidos pueden ser útiles en ejercicios de contabilidad, pero no necesariamente se relacionan con el valor que tiene la infraestructura ni con las inversiones requeridas para mantener en el tiempo un adecuado servicio a los usuarios de esta. Por esta razón, no permiten una adecuada gestión del patrimonio vial en el tiempo. La vida útil por considerar en un activo debe estar definida a partir del umbral mínimo de servicio permitido durante la operación de este. Por ejemplo, la definición de vida útil de un pavimento, o una luminaria, o un dispositivo de seguridad debe relacionarse con el momento donde el activo ya no es capaz de entregar la comodidad o seguridad al usuario que transita por la vía, según corresponda.

En caso de escoger los métodos de depreciación, se recomienda no emplear depreciación lineal por no reflejar el patrón de algunos activos de carreteras. Por ejemplo, se sabe que los puentes exhiben patrones sigmoidales de deterioro y los pavimentos exhiben patrones que generalmente son curvilíneos, pero se requiere de una amplia base de datos para la calibración de las constantes involucradas (Dojutrek et al., 2012). Para activos como señales verticales y elementos de seguridad podría ser un método adecuado ya que, en primera instancia, no ameritan un análisis exhaustivo en la selección de métodos, debido a su menor valor respecto al valor total de la infraestructura vial. Además, son activos que normalmente se reemplazan debido a obsolescencia técnica y a cambios en normativas. Dado que para los pavimentos asfálticos se tienen indicadores de condición, se descartan estos métodos.

Con respecto a los *enfoques modificados*, estos consideran la condición de los activos en el momento de la evaluación, sin embargo, es necesario contar con modelos de deterioros que predigan la condición del activo en cualquier momento. Este método puede aplicarse a los distintos componentes de un activo, si se consideran los costos de construcción por separado, lo que reflejaría de mejor manera el valor total. Esta forma de valoración se considera más apropiada que los métodos de depreciación, puesto que podría reflejar el servicio entregado por el activo al considerar una condición. El *método de valor fijo con respecto a la condición límite* no se considera apropiado para pavimentos, ya que tiene un comportamiento binario, lo cual no coincide con el comportamiento típico del activo.

Otro método de depreciación es el *método de valor neto residual* que contempla el costo de rehabilitación del activo, método similar al empleado para caminos pavimentados en la Red Vial Nacional de Chile (Sección 1.1.3). Esta forma de evaluación es óptima si se define una actividad que lleve efectivamente al activo a una condición prístina, contemplando además, cualquier pérdida de valor y no haber alcanzado algún nivel de intervención para realizar la conservación. Una desventaja de este método es que depende de los valores de mercado de las rehabilitaciones, lo cual puede subestimar o sobrestimar el valor de un activo, siendo un aspecto no manejable por el concesionario. Al considerar la condición del activo, puede relacionarse con el modelo de Nivel de Servicio, siendo un método acorde con los objetivos.

Los *métodos de costo histórico y de reemplazo* no se consideran apropiados para la valoración de activos viales, dado que no representan ni la condición de los activos ni la vida útil restante y están influenciados netamente por un valor de mercado y la antigüedad del activo. En el caso del método de costo de reemplazo se considera el reemplazo total del activo, independiente de su condición y servicio entregado. Ambas opciones presentan la desventaja de que dos activos similares, en distinta condición y servicio prestado, pueden tener el mismo valor monetario. Estos métodos se descartan ya que no cumplen con los requerimientos definidos.

Los métodos propuestos por el estudio de INDOT (Dojutrek et al., 2012) pretenden abordar las limitaciones de los métodos tradicionales de valoración. El *método EDMC* valora los activos según la condición y la vida útil restante de los activos, mediante una importancia relativa a los usuarios y a la agencia. Si bien este método trata de considerar ambas propuestas de valoración, no se presenta una metodología objetiva para calcular los factores de ponderación.

Un aspecto rescatable de este método es que considera que los activos pueden valorizarse por la suma de sus componentes; también se concluye que hay ciertos tipos de activos viales que su valor será representado de mejor manera al utilizar una relación de condiciones (por ejemplo, los pavimentos) y existirán otros tipos de activos, en que el enfoque de depreciación es una forma más adecuada. Será materia de análisis, el método más apropiado para los distintos activos viales existentes. Para el caso de pavimentos asfálticos, y de acuerdo con los objetivos planteados, el valor del activo es mejor representado por la condición, considerando además, la división de los componentes.

Con respecto al *método probabilista* se espera que refleje de mejor manera la vida útil de los activos, ya que considera como variable un modelo de comportamiento. Un modelo completo debiese considerar varios parámetros o características del pavimento, con el fin de representar de manera adecuada el comportamiento del activo. Por ejemplo, en el estudio de Indiana (Dojutrek et al., 2012) el modelo de supervivencia solo considera un deterioro del pavimento, expresado por el nivel de IRI. En caso de desarrollarse modelos de este tipo, se recomienda relacionar distintos deterioros o indicadores del pavimento para su definición.

Desde el punto de vista de la gestión, estos modelos serían de mucha ayuda para el que debe mantener el activo, ya que podría predecir el momento necesario para realizar algún tipo de actividad de rehabilitación y así reducir la probabilidad de falla. En el contexto de estudio, no se dispone de modelos de comportamiento, sino de indicadores técnicos y umbrales admisibles en función del nivel de servicio, lo

que no permite calibrar una distribución de probabilidad de supervivencia para los pavimentos. Además, desde el punto de vista del Estado, no es relevante saber cuándo va a fallar el pavimento, si no, cuanto valor tiene el activo en un momento en particular, ya que la gestión de la infraestructura no depende de él.

Al evaluar los métodos basados en los costos, se concluye que existen varios métodos que incluyen la condición de los activos, siendo uno de los objetivos de este trabajo de investigación. También se observa que varios métodos son compatibles con el modelo de Nivel de Servicio, ya que utilizan umbrales de condición. En general, se puede decir que tienen un bajo costo de cálculo y requieren información fácilmente disponible, sin embargo, algunos requieren de calibración y/o modelos de comportamiento. Por otra parte, algunos métodos evalúan aspectos que son atribuibles a la gestión del concesionario, por lo que se alinean a las particularidades del método que se quiere desarrollar.

Al analizar los métodos basados en beneficios, se observa que es adaptable a las necesidades de las agencias viales, considera el rol económico de los activos y permite conocer el impacto de una posible falla de un elemento de la carretera. El *método RDS* es una buena forma de valoración de activos viales, dado que incluye todos los costos que deben incurrirse para reemplazar un activo. Sin embargo, al no evaluar la condición actual de un activo, contempla el reemplazo de componentes que aún pueden estar prestando un servicio adecuado o que estén en una condición similar a la original (“como nuevo”). En este método se considera el costo por reemplazo total del activo, por lo que no es adecuado para reflejar el valor del patrimonio en base a la condición o al servicio entregado, quedando descartado en la elección.

Del estudio revisado (Stone, 2014) se concluye que considerar los impactos económicos aumenta considerablemente el valor de carreteras y que esta evaluación debe ser utilizada como respaldo para la toma de decisiones financieras, pero no como resultado para el valor de activos viales. De la misma forma, este método no considera la condición ni vida útil de los activos, por lo que no es compatible con el modelo de Nivel de Servicio, ya que no se consideran indicadores técnicos ni umbrales de intervención. En general, el método requiere de supuestos para definir los parámetros involucrados y presenta un alto costo computacional.

El enfoque de costos y beneficios, denominado “*enfoque de utilidad*” (Peters & Zhang, 2014) busca combinar los dos enfoques anteriores por medio del capital y la productividad económica. Se contempla factores de condición física y funcionalidad de los activos, por lo que sería compatible con el modelo de Nivel de Servicio, aunque requiere de muchos supuestos y base de datos para la definición y calibración de las funciones de utilidad. A pesar de considerar los beneficios o el valor de una carretera, las funciones de utilidad no contemplan pérdidas por condición o mal desempeño de los activos y dependen de la actitud de riesgo de cada agencia, por lo que no es posible evaluar la gestión del concesionario.

El *método D&R (enfoque de mercado)* valoriza una carretera en función del costo del terreno, siendo utilizado y más adecuado para sectores urbanos, donde el precio unitario del terreno es elevado y es una opción viable hacer una reubicación de caminos. Por el contrario, en proyectos de carreteras interurbanas no refleja de forma adecuada el valor de la cantidad total de activos, ni la condición de estos, por lo que se descarta en la elección.

De los tres grupos de métodos revisados en la literatura, el enfoque de costos es el que mejor se adapta a los requerimientos de este estudio, ya que considera la condición de los activos en el tiempo, lo que es compatible con los resultados del modelo de Nivel de Servicio. Se debe tener presente en el cálculo los altos estándares de comodidad y seguridad que tienen que entregar las carreteras concesionadas. El enfoque de beneficios económicos y el subenfoco de utilidad son buenos métodos para valorizar los activos viales cuando se quiere evaluar la productividad y rentabilidad que provoca una carretera tanto en los usuarios, no usuarios y la agencia vial.

La metodología para evaluar los caminos pavimentados en la Red Vial Nacional de Chile (Sección 1.1.3) es un método que considera la condición del activo y los costos de rehabilitación (enfoque de costos). Este enfoque contempla aspectos considerados en el método de valor neto residual y en los enfoques modificados al establecer límites o umbrales de condición para realizar alguna actividad de conservación. Se considera adecuada la metodología de árboles de decisión para distintos tipos de pavimentos, pero es necesario realizar una adaptación de límites de intervención, puesto que los estándares son superiores en carreteras concesionadas. Esta metodología también podría replicarse a otros activos de comportamiento similar a los pavimentos. Tal como se mencionó para el método de valor neto residual, este método de evaluación es óptimo si se define una actividad de rehabilitación que lleve efectivamente al activo a su condición original (como nuevo); también se requiere estudiar los efectos del mercado en las actividades, ya que pueden subestimar o sobrestimar el valor.

En base al enfoque de valoración en los nuevos contratos de concesión (Sección 1.1.4), se observa que el valor residual de la infraestructura está acotado mediante un valor base y un valor máximo obtenidos a partir de depreciación lineal, donde se considera una vida útil de 50 y 70 años, respectivamente. Esta metodología podría mejorarse si se considera los activos por separado con su respectiva vida útil, en lugar de considerar todos los activos como uno solo. Por otra parte, existe un valor residual obtenido en función de la metodología desarrollada por la Dirección de Vialidad (MOP, 2016-b), que considera el valor neto residual para caminos pavimentados y depreciación lineal para otros activos (túneles, puentes, etc.), sin embargo, falta aclarar si los límites de intervención que definen las acciones de conservación serán los mismos del documento referenciado o se ajustarán a las exigencias por niveles de servicio y conservación definidos para la concesión. Esto representa un aspecto a mejorar en el desarrollo de un método de valoración para el activo, ya que en la actual metodología, su valor no depende de la serviciabilidad con la que fue diseñado.

Este trabajo tiene por objetivo establecer un método que sea aplicable a las bases de licitación, permitiendo definir el valor del Patrimonio Vial de una concesión al momento en que se le entrega al privado, como también cuando lo recibe de vuelta la Dirección General de Concesiones. De esta forma, se requiere que sea compatible con el Nivel de Servicio entregado a los usuarios, mediante la medición de indicadores técnicos objetivos, lo que no se considera actualmente en los valores base y máximo definidos para los contratos de concesiones viales.

### 1.2.3. Selección método de valoración

En base a todo el análisis anterior, el método por desarrollar será una adaptación del método utilizado por la Dirección de Vialidad para los caminos pavimentados, también conocido como método valor neto residual. La formulación general se visualiza en la Ecuación 1.2.1:

$$V_{PA_t} = CH - C_{Rehab_t} \quad (1.2.1)$$

Donde:

$V_{PA_t}$  : Valor del activo pavimento asfáltico en el tiempo “t”, en [UF].

$CH$  : Costo histórico del pavimento, en [UF].

$C_{Rehab_t}$  : Costo necesario para llevar al activo a la condición inicial “como nuevo” en el tiempo “t”, en [UF].

Las razones para escoger este método para los pavimentos asfálticos se sustentan en el contexto y objetivo de estudio, las cuales son detalladas a continuación:

- Los pavimentos son el activo más importante en términos de valor en una carretera y se ha estimado que su valor respecto al valor total de una carretera o una red vial se encuentra entre un 45 % y 75 % (Dojutrek et al., 2012; Hogg & Reid, 2017; MOP, 2019-d; Weldemicael et al., 2018). En consecuencia, este activo requiere una valorización precisa y basada en indicadores técnicos apropiados, la cual se puede lograr con este método de valoración.
- Los resultados del modelo de Nivel de Servicio consisten en indicadores técnicos que evalúan características del pavimento en forma independiente y no una condición general o global, por lo que métodos como los enfoques modificados no se compatibilizan directamente con el trabajo ya realizado. Si bien estos métodos de valoración consideran el estado en que se encuentra el activo, que es parte de los objetivos buscados, la condición definida para el cálculo requiere de una combinación o ponderación de los indicadores ya desarrollados. La combinación o ponderación de los indicadores a una condición general requiere de técnicas o metodologías para definirlos, por ejemplo, la técnica discreta multicriterio AHP (Saaty, 1990); además, estos ponderadores debiesen relacionar la importancia que tiene cada uno para el cálculo del valor patrimonial, lo cual no tiene desarrollo del estado del arte o la práctica. El método de valor neto residual permite la aplicación directa y sencilla de los indicadores técnicos objetivos y sus umbrales admisibles.
- Permite evaluar la gestión del concesionario durante la etapa de explotación, ya que considera la inversión que se debe ejecutar para llevar a los pavimentos a una mejor condición y por tanto, elevar el nivel de servicio entregado a los usuarios. Esta inversión se debe a que se consideran los costos necesarios para llevar al activo a la condición inicial de “como nuevo”. Si el costo de rehabilitar el pavimento es alto, el valor del activo disminuye, lo que significa que la gestión del concesionario no está cumpliendo con los estándares definidos para la vía. Por otra parte, se

considera evaluar mediante el costo histórico del pavimento y no utilizar el costo de reemplazo, ya que permite evaluar la eficiencia del concesionario y no los cambios de precios en el mercado que puedan beneficiar o perjudicar el valor del patrimonio.

- Es un método conocido y usado en el contexto nacional de Chile, por lo que se reducen las brechas tecnológicas para su implementación. Aunque deban realizarse adaptaciones con respecto a la definición de límites de intervención y actividades de conservación, no existe un impedimento con respecto a la modelación misma.
- El método permite una adaptación y flexibilidad relativamente sencilla de futuros indicadores técnicos del pavimento o requerimientos de los usuarios, ya que solo deben definirse nuevos límites de intervención y actividades de conservación. Esta flexibilidad también permite considerar nuevas tecnologías en la rehabilitación de pavimentos.

Las razones expuestas anteriormente se alinean también a las consideraciones de LoBEG (LoBEG, 2012) que plantean que es más apropiado hacer una valoración con la condición de los activos ya que estos datos se recopilan regularmente, además de que la vida útil es un parámetro muy variable y difícil de definir en algunos casos. Por último, también se menciona que se debe descartar la depreciación lineal porque requiere de un esfuerzo innecesario para actualizar la vida útil de los componentes de los activos, en este caso, de las diferentes capas de pavimento que una carretera pueda tener.

## Capítulo 2

# Método de valoración para calzada principal

El presente capítulo tiene por objetivo desarrollar el método de valoración para pavimentos asfálticos de carreteras interurbanas concesionadas. En base a esto, el capítulo se configura de la siguiente forma:

- En la Sección 2.1, se detalla el cálculo del costo histórico del activo, incluyendo aspectos relevantes a considerar.
- En la Sección 2.2, se presentan los conceptos generales para el cálculo del costo de rehabilitación. Se incluye además, los indicadores técnicos y umbrales admisibles en función del nivel de servicio entregado por el activo.
- En la Sección 2.3, se definen las actividades de rehabilitación para cada uno de los indicadores técnicos del pavimento.
- En la Sección 2.4, se detallan otros costos que deben ser agregados en el cálculo del valor del activo.

## 2.1. Cálculo del costo histórico

El cálculo del costo histórico considera el costo total del pavimento, incluyendo sus diferentes capas, por tanto, el valor total depende principalmente de los materiales y espesores de cada proyecto en particular. Asimismo, el valor total debe considerar los diferentes tramos que puede tener un proyecto, con sus respectivas características.

Otros aspectos que se deben agregar es la demarcación del pavimento y los gastos indirectos, ya que ambos contribuyen en el valor del activo. Las consideraciones y cálculos asociados a cada uno son detallados en la Sección 2.4.1 y 2.4.2, respectivamente.

Bajo el contexto de que el método debe implementarse en bases de licitación y quedar definido en el momento del llamado a licitación, el costo histórico se obtiene con las obras del anteproyecto y con los precios unitarios descritos en la base de licitación respectiva.

A continuación, son presentadas algunas partidas que pueden considerarse para el cálculo del costo histórico de los pavimentos asfálticos, basadas en el Anexo N°3: Precios Unitarios Oficiales de los contratos de licitación. Las partidas de la Tabla 2.1.1 fueron incluidas en el último contrato de licitación (MOP, 2021) y se encuentran itemizadas según el Manual de Carreteras, Volumen N°5 (MOP, 2020-d).

**Tabla 2.1.1:** Ejemplos de partidas involucradas en el cálculo del costo histórico de pavimentos flexibles.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
5.200	MOVIMIENTO DE TIERRAS	
209-1	Preparación de la Subrasante	$m^2$
5.300	CAPAS GRANULARES	
301-1	Sub-base Granular, $CBR \geq 40\%$	$m^3$
301-2	Sub-base Granular, $CBR \geq 50\%$	$m^3$
302-1	Base Granular, $CBR \geq 80\%$	$m^3$
302-2	Base Granular, $CBR \geq 100\%$	$m^3$
5.400	REVESTIMIENTOS Y PAVIMENTOS	
401-1	Imprimación	$m^2$
402-1	Riego de Liga	$m^2$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$
408-3	Base Asfáltica en Caliente de Graduación Gruesa	$m^3$

Las partidas incluyen la provisión y suministro de todos los materiales, equipos y mano de obra necesarios para la confección, colocación, compactación, terminación, mantención de los materiales. También se incluyen los demás trabajos y actividades requeridas para cumplir con los estándares e indicaciones dispuestos en el Manual de Carreteras.

Es importante mencionar que las partidas definidas anteriormente representan un ejemplo para el cálculo del costo histórico y que en caso de construirse una carretera con otros materiales, estos deben ser incluidos en el valor final. Por ejemplo, utilizar bases tratadas con cementos (BTC) o mezclas stone mastic asphalt (SMA), itemizadas como 304-1 y 415-1 (MOP, 2020-d), respectivamente.

En caso de construirse o reconstruirse una sección de un sector o subsector con materiales que no estén tabulados en las bases de licitación de la concesión, el Inspector Fiscal debe autorizar el ingreso de nuevos precios unitarios por medio de un Decreto Oficial.

### 2.1.1. Formulación del costo histórico

Como se mencionó anteriormente, el costo histórico debe incluir todos los sectores o subsectores de un proyecto. Un sector o subsector es aquel tramo que tiene un tipo de pavimento de iguales características (materiales y espesores). La Ecuación 2.1.1 presenta todos los costos involucrados en la definición del costo histórico de una carretera.

$$CH = \sum_{s=1}^p CH_s + C_{Dem} + GI_{CH} \quad (2.1.1)$$

Donde:

$CH$  : Costo histórico del pavimento asfáltico de la carretera, en [UF].

$CH_s$  : Costo histórico del sector o subsector “s”, en [UF].

$p$  : Cantidad total de sectores o subsectores “s” del proyecto.

$C_{Dem}$  : Costo por la demarcación horizontal del pavimento, en [UF] (detalle del cálculo en Sección 2.4.1).

$GI_{CH}$  : Gastos indirectos asociados al costo histórico del pavimento, en [UF] (detalle de las consideraciones en Sección 2.4.2).

La Ecuación 2.1.2 representa el cálculo del costo histórico de un sector o subsector.

$$CH_s = \sum_{j=1}^m PU_j \cdot C_j \quad (2.1.2)$$

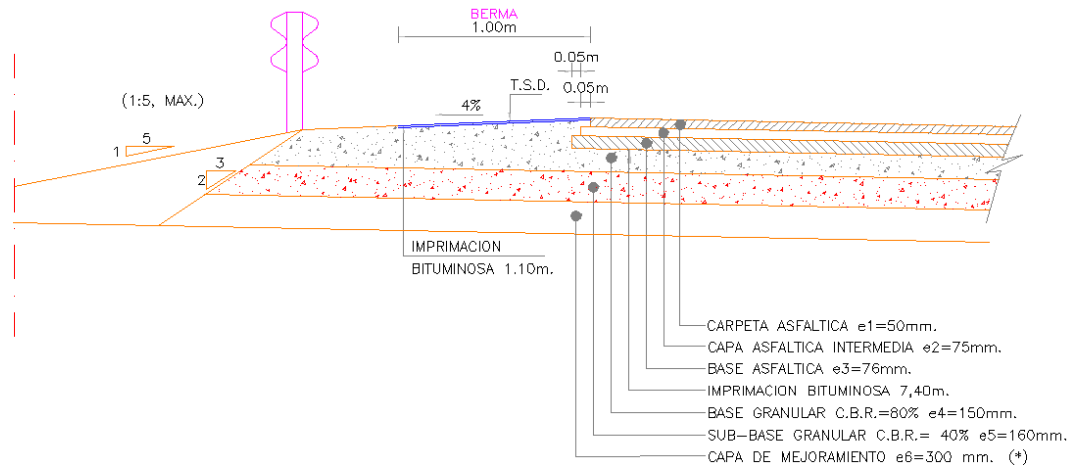
Donde:

$PU_j$  : Precio Unitario de material o actividad “j” en  $[UF/m^2]$  o  $[UF/m^3]$ , según sea el caso.

$C_j$  : Cantidad de material o actividad ejecutada “j” en  $[m^2]$  o  $[m^3]$ , según sea el caso.

$m$  : Cantidad total de capas de material o actividades ejecutadas en un sector o subsector “s”.

A modo de ejemplo, se tiene un subsector de 6.20 km de longitud con los espesores y materiales detallados en la Figura 2.1.1. El tramo corresponde al Sector A1-A2: Avenida Circunvalación Américo Vespucio - Bypass Colina, correspondiente a la Concesión Ruta 57 Santiago - Colina - Los Andes (MOP, 1996). Esta es una carretera interurbana concesionada que se encuentra en la zona central del país, por tanto, ha sido diseñada y construida para las condiciones geográficas y climáticas de la zona. Otras concesiones ubicadas en distintas zonas podrían tener una estructura de pavimento diferente, por lo que para cada proyecto se debe calcular el costo histórico considerando las características propias.



**Figura 2.1.1:** Perfil tipo de Concesión Santiago-Colina-Los Andes.

Fuente: Información proporcionada por DGC (2020).

**Tabla 2.1.2:** Precios Unitarios Oficiales sin IVA (Adaptado de MOP, 1996).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	P.U. (UF)	CANTIDAD	P.T. (UF)
5.200	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
*	Mejoramiento de la subrasante	m <sup>2</sup>	0.1502	21,700	3,259.3
5.209	Preparación de la Subrasante	m <sup>2</sup>	0.0130	21,700	282.1
5.300	SUBBASES Y BASE				
301-1	Sub-base Granular, CBR ≥ 40%	m <sup>3</sup>	0.4000	3,472	1,388.8
302-1	Base Granular, CBR ≥ 80%	m <sup>3</sup>	0.4900	3,255	1,595.0
5.400	REVESTIMIENTOS Y PAVIMENTOS				
401-1	Imprimación Bituminosa	m <sup>2</sup>	0.0170	21,700	368.9
402-1	Riego de Liga	m <sup>2</sup>	0.0090	21,700	195.3
408-1	Concreto Asfáltico de Rodado	m <sup>3</sup>	2.2280	1,085	2,417.4
408-2	Concreto Asfáltico Tipo Binder	m <sup>3</sup>	1.9400	1,627.5	3,157.4
408-3	Base Asfáltica	m <sup>3</sup>	1.7850	1,649.2	2,943.8
	<b>Total</b>				<b>15,607.9</b>

Del respectivo contrato (MOP, 1996) se tienen los Precios Unitarios (P.U.) mostrados en la Tabla 2.1.2. Además, se presentan las Cantidades y Precio Total (P.T.) calculados para los distintos materiales y actividades ejecutadas considerando una pista de ancho 3.5 m y los espesores correspondientes a los de la Figura 2.1.1. Los costos por demarcación del pavimento y gastos indirectos no han sido incluidos.

La nomenclatura de las partidas (ítem) fueron actualizados a los dispuestos por el Manual de Carreteras en su versión más reciente (MOP, 2020-d), a excepción de la partida “Mejoramiento de la subrasante” que no se encuentra itemizada actualmente.

### **2.1.2. Consideración de nuevas inversiones**

En virtud de lo dispuesto en el artículo 19 de la Ley de Concesiones con relación a los artículos 69 y 103 del Reglamento (MOP, 2010-a), en caso de que algún proyecto requiera nuevas inversiones con el objeto de incrementar los niveles de servicio y estándares técnicos establecidos en las bases de licitación o por otras razones de interés público debidamente fundadas, el MOP podrá modificar las características de las obras y servicios contratados, y como consecuencia de ello deberá compensar económicamente al Concesionario cuando corresponda por los costos adicionales en que éste incurriere por tal concepto.

Las modificaciones de obras y servicios así como de las condiciones económicas del Contrato de Concesión se autorizarán en forma previa a su ejecución mediante Decreto Supremo fundado expedido por el MOP el que deberá llevar además la firma del Ministro de Hacienda.

Para la determinación de las obras, su valoración y ejecución se utilizarán los siguientes procedimientos (MOP, 2019-a; MOP, 2021):

- Determinación de las obras: se determinarán en base a un estudio de ingeniería preparado por la Sociedad Concesionaria el cual deberá someterse a la revisión del Inspector Fiscal hasta la obtención de su respectiva aprobación. En caso de que las obras sean iniciativa del MOP, el Inspector Fiscal entregará a la Sociedad Concesionaria un diseño conceptual en base al cual ésta elaborará el Proyecto de Ingeniería de Detalle.
- Valorización y ejecución de las obras: los volúmenes de obra de las nuevas inversiones durante la Concesión se presupuestarán en base a los Precios Unitarios Oficiales del Proyecto de acuerdo con el Anexo N°3 de las bases de licitación. Los precios unitarios de cada uno de los ítems involucrados en las obras de las nuevas inversiones exigidas durante la Etapa de Construcción o de Explotación que no estén en el Anexo N°3 de las bases de licitación, serán determinados de común acuerdo entre el Concesionario y el MOP.

De acuerdo con lo anterior, cualquier inversión que modifique el costo histórico del pavimento, por ejemplo la adición de terceras pistas debe ser incorporado al valor del activo, utilizando las mismas fórmulas presentadas en esta sección.

## 2.2. Definiciones para el cálculo del costo de rehabilitación

El costo de rehabilitación será definido en función del nivel de desempeño de los indicadores técnicos del pavimento, el cual está asociado al nivel de servicio entregado a los usuarios. En primer lugar, se presentan los indicadores técnicos y umbrales admisibles para cada nivel de desempeño y luego, los principios para calcular el costo de rehabilitación.

### 2.2.1. Indicadores técnicos y umbrales de desempeño

Del proyecto FONDEF IT16I10008 “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones” (Delgadillo et al., 2020), se definieron las características que deben ser evaluadas en los pavimentos flexibles en un contexto de gestión global de una carretera, las cuales están asociadas tanto a la funcionalidad como integridad del activo. Estas son presentadas a continuación:

- Regularidad longitudinal del pavimento
- Regularidad transversal del pavimento
- Nivel de ruido de la interacción neumático-pavimento
- Resistencia al deslizamiento en la capa de rodadura
- Agrietamientos del pavimento
- Deflexiones del pavimento

Las características relevantes se evalúan a través de indicadores técnicos objetivos y medibles a lo largo del tiempo. En la Tabla 2.2.1 se presentan las características seleccionadas y su correspondiente indicador técnico para evaluar el desempeño.

**Tabla 2.2.1:** Características e indicadores técnicos a emplear en la valoración de pavimentos flexibles.

Característica evaluada	Indicador técnico
Regularidad longitudinal del pavimento	Mean Roughness Index (MRI)
Regularidad transversal del pavimento	Rut Depth (RD)
Nivel de Ruido de Rodadura	Overall A-weighted Sound Intensity Level (OASI)
Resistencia al deslizamiento de la Capa de Rodadura	SFC equivalente (SFC equiv.)
Agrietamientos en pavimentos flexibles	Porcentaje de agrietamiento (% Agriet.)
	Deflexión máxima ( $D_0$ )
	Índice de Capa Base (BLI)
	Índice de Capa Media (MLI)
Deflexiones del pavimento	Índice de Capa Inferior (LLI)

La Tabla 2.2.2 muestra los umbrales para cada uno de los indicadores técnicos en función del nivel de desempeño, los cuales han sido definidos bajo los estándares de comodidad y seguridad que deben entregar las carreteras concesionadas. Además, se muestra la longitud que deben tener las secciones evaluadas para que estos sean válidos. Por ejemplo, el indicador MRI debe ser reportado en secciones de 50 m de longitud.

**Tabla 2.2.2:** Umbrales por nivel de desempeño a emplear en la valoración de pavimentos flexibles.

Nivel de desempeño	Indicador técnico				
	MRI (50m) [m/km]	RD (50m) [mm]	OASI (200m) [dBA]	SFC equiv. (50m) [-]	Agrietamiento (50m) [%]
<b>Muy Bueno</b>	[0.0 , 1.5)	[0.0 , 4.0)	≤ 100	(0.65 , 1.00]	[0.0 , 4.0)
<b>Bueno</b>	[1.5 , 2.5)	[4.0 , 7.0)	(100 , 102]	(0.55 , 0.65]	[4.0 , 7.0)
<b>Justo</b>	[2.5 , 3.5)	[7.0 , 10.0]	(102 , 104]	(0.40 , 0.55]	[7.0 , 10.0)
<b>Malo</b>	[3.5 , 5.0)	(10.0 , 15.0]	(104 , 106]	(0.20 , 0.40]	[10.0 , 15.0]
<b>Muy Malo</b>	≥ 5.0	> 15.0	> 106	[0.00 , 0.20]	> 15.0

Para el caso de las deflexiones del pavimento, las Tablas 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5, 2.2.6 y 2.2.7 muestran los umbrales para los respectivos indicadores. Se hace la distinción para la deflexión máxima  $D_0$  según la cantidad de Ejes Equivalentes de diseño de la carretera y según el tipo de base empleada en el diseño estructural del pavimento. Todos estos indicadores deben ser reportados en secciones de 50 m. Las fichas técnicas de cada uno de los indicadores se presentan en el Apéndice A.

**Tabla 2.2.3:** Umbrales por nivel de desempeño de  $D_0$  en carreteras con EE de diseño mayor a 20 millones.

Nivel de desempeño	$D_0$ (50 m)		
	[ $\mu m$ ]		
	Tipo base		
	Base Granular	Base Cementada	Base Bituminosa
<b>Muy Bueno</b>	≤ 200	≤ 125	≤ 200
<b>Bueno</b>	(200 , 300]	(125 , 150]	(200 , 300]
<b>Justo</b>	(300 , 400]	(150 , 200]	(300 , 400]
<b>Malo</b>	(400 , 500]	(200 , 250]	(400 , 500]
<b>Muy Malo</b>	> 500	> 250	> 500

**Tabla 2.2.4:** *Umbrales por nivel de desempeño de  $D_0$  en carreteras con EE de diseño entre 10 y 20 millones.*

Nivel de desempeño	$D_0$ (50 m)		
	[ $\mu m$ ]		
	Tipo base		
	Base Granular	Base Cementada	Base Bituminosa
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 375$	$\leq 225$	$\leq 375$
<b>Bueno</b>	(375 , 450]	(225 , 250]	(375 , 450]
<b>Justo</b>	(450 , 500]	(250 , 450]	(450 , 500]
<b>Malo</b>	(500 , 600]	(250 , 450]	(500 , 600]
<b>Muy Malo</b>	$> 600$	$> 450$	$> 600$

**Tabla 2.2.5:** *Umbrales por nivel de desempeño de BLI empleados en la valoración de pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	BLI (50 m)		
	[ $\mu m$ ]		
	Tipo base		
	Base Granular	Base Cementada	Base Bituminosa
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 50$	$\leq 25$	$\leq 50$
<b>Bueno</b>	(50 , 100]	(25 , 40]	(50 , 100]
<b>Justo</b>	(100 , 200]	(40 , 100]	(100 , 200]
<b>Malo</b>	(200 , 300]	(100 , 300]	(200 , 400]
<b>Muy Malo</b>	$> 300$	$> 300$	$> 400$

**Tabla 2.2.6:** *Umbrales por nivel de desempeño de MLI empleados en la valoración de pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	MLI (50 m)		
	[ $\mu m$ ]		
	Tipo base		
	Base Granular	Base Cementada	Base Bituminosa
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 40$	$\leq 30$	$\leq 30$
<b>Bueno</b>	(40 , 70]	(30 , 40]	(30 , 65]
<b>Justo</b>	(70 , 100]	(40 , 60]	(65 , 100]
<b>Malo</b>	(100 , 200]	(60 , 100]	(100 , 150]
<b>Muy Malo</b>	$> 200$	$> 100$	$> 150$

**Tabla 2.2.7:** *Umbrales por nivel de desempeño de LLI empleados en la valoración de pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	LLI (50 m)		
	[ $\mu m$ ]		
	Tipo base		
	Base Granular	Base Cementada	Base Bituminosa
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 30$	$\leq 30$	$\leq 30$
<b>Bueno</b>	(30 , 40]	(30 , 35]	(30 , 40]
<b>Justo</b>	(40 , 50]	(35 , 40]	(40 , 50]
<b>Malo</b>	(50 , 100]	(40 , 80]	(50 , 80]
<b>Muy Malo</b>	$> 100$	$> 80$	$> 80$

### 2.2.2. Pérdidas por nivel de desempeño

El valor del pavimento disminuye con el grado de deterioro que presenta, estos deterioros son menores en los primeros años e incrementan rápidamente con el paso del tiempo. Con el aumento de los deterioros, los indicadores técnicos van disminuyendo su desempeño desde un nivel Muy Bueno hasta llegar a la peor condición, si es que no existe ninguna rehabilitación en el activo. Es decir, frente a cada disminución del desempeño de los indicadores técnicos, el pavimento experimenta una disminución de su valor.

Un pavimento tiene una vida residual de cero cuando sobrepasa un cierto nivel en algún indicador técnico, por ejemplo, la FHWA Pavement Health Track (PHT) establece una vida residual de cero para un pavimento con un valor de RD (Rut Depth) mayor o igual a 10 mm (AASHTO, 2008). Estos niveles dependen de la serviciabilidad que se espera entregar. Si bien esto indica que el pavimento ha perdido valor, es necesario determinar qué sección y capa del pavimento ha perdido efectivamente valor en función de los indicadores técnicos, con el fin de determinar una actividad de rehabilitación que eleve el estado del pavimento y el nivel de servicio entregado.

En el presente estudio se establece que cuando un indicador técnico alcanza el nivel de desempeño “Malo”, el pavimento ha alcanzado una vida residual de cero para alguna sección. El valor de esta pérdida es equivalente al costo de rehabilitación que lleve al pavimento a una condición “como nuevo”. De esta manera, para cada indicador técnico descrito previamente se definirá una única actividad de rehabilitación, que será determinada en función de experiencias prácticas de mantenciones en pavimentos de alto estándar. Por ejemplo, cuando el indicador MRI alcance los 3.5 m/km se define una pérdida equivalente al costo de llevar al indicador al nivel de desempeño “Muy Bueno” (0.0 - 1.5 m/km).

Es importante mencionar que cada actividad se relaciona con una pérdida equivalente de valor del activo y no con el mantenimiento que el concesionario decida realizar para mejorar la condición del pavimento. Con el propósito de reducir la incertidumbre en la valoración y los riesgos del proyecto, se define una única alternativa de rehabilitación y no un conjunto de actividades que puedan restaurar la condición del pavimento.

Dado que se ha establecido que cuando un indicador alcanza el nivel de desempeño Malo existe una pérdida equivalente al costo de rehabilitar el pavimento, es necesario determinar cuanta pérdida se tiene cuando algún indicador se encuentra en otro de los niveles de desempeño con el fin de establecer puntos intermedios de pérdida de valor del activo.

Puesto que las actividades de rehabilitación usualmente se seleccionan para umbrales o rangos de los indicadores técnicos, se propone definir porcentajes de la pérdida que se alcanza en el nivel de desempeño Malo y que es equivalente al costo de rehabilitación del pavimento. Estos porcentajes se determinarán en base al comportamiento típico de los deterioros del pavimento y a la relación entre los distintos umbrales de desempeño. Es necesario recalcar que estos porcentajes se establecerán para proyectar una pérdida de valor, pero la actividad de rehabilitación y su costo asociado es uno solo.

Como consecuencia, para el nivel de desempeño “Muy Malo” se debe establecer un porcentaje mayor del costo de la actividad definida para el indicador técnico, ya que el pavimento se encuentra con más deterioro, pudiendo necesitarse una actividad de mayor envergadura. Se supone que los indicadores nunca deberían alcanzar estos niveles de desempeño, pero en caso de hacerlo, se considera una pérdida mayor de la actividad mínima definida para llevar al activo a su mejor condición.

Lo anterior se ve reflejado en la Tabla 2.2.8, siendo un ejemplo de porcentajes para el cálculo de la pérdida de valor para el indicador de regularidad longitudinal (MRI).

**Tabla 2.2.8:** *Ejemplo de porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador MRI en pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	MRI (50m) [m/km]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{MRI}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	[0.0 , 1.5[	0
<b>Bueno</b>	[1.5 , 2.5[	15*
<b>Justo</b>	[2.5 , 3.5[	60*
<b>Malo</b>	[3.5 , 5.0[	100
<b>Muy Malo</b>	$\geq 5.0$	140*

(\*) Estos porcentajes son teóricos y se definen para establecer la pérdida de valor por nivel de desempeño

De la Tabla 2.2.8 se observa que para el nivel de desempeño “Malo” el valor de la pérdida del activo es equivalente al 100% del valor de la actividad requerida para llevar al pavimento a su condición “como nuevo”, ya que es definida para esos umbrales.

Para el nivel “Muy Bueno” el pavimento se encuentra en la condición “como nuevo”, por lo que no ha perdido valor. Lo anterior supone que el pavimento siempre puede alcanzar su valor inicial (costo histórico) si los indicadores de desempeño se encuentran en la mejor condición posible, independiente de la edad del pavimento.

Para los niveles “Bueno” y “Justo” se establece una proporción menor del valor de la actividad requerida, ya que el pavimento aun no alcanza su vida residual de cero. Por último, para el nivel “Muy Malo” la proporción con respecto a esta pérdida de valor es mayor. Por ejemplo, si una sección de 50 m tiene un MRI igual a 2.8 m/km (nivel Justo) la pérdida de valor es equivalente al 60 % del costo de rehabilitar un MRI en nivel Malo. Los porcentajes teóricos de la tabla anterior (15 %, 60 % y 140 %) son mencionados a modo de ejemplo y serán definidos en función de los siguientes principios:

Del comportamiento típico de la vida de los pavimentos se puede concluir que la condición disminuye lentamente los primeros años de vida del pavimento, luego tiene un descenso a una mayor tasa, para finalmente, disminuir la tasa de deterioro en sus últimos años. Por tanto, las proporciones teóricas del costo de la actividad de rehabilitación para los niveles “Bueno”, “Justo” y “Muy Malo” reflejarán lo anterior, evitando utilizar pérdidas equitativas.

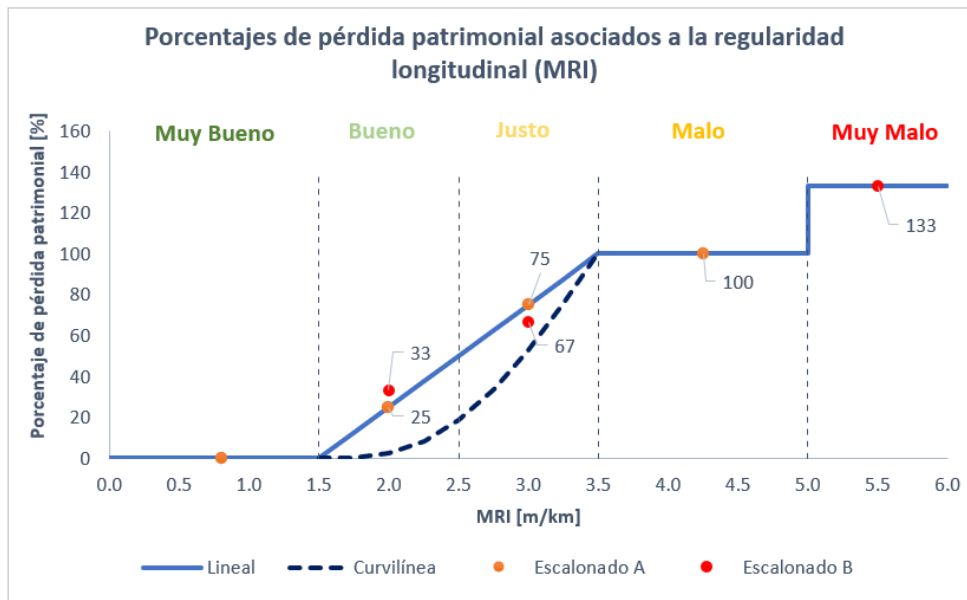
Otra forma para establecer estos porcentajes es utilizar los fundamentos de los enfoques modificados, en particular, el método del valor ajustado con respecto a la condición límite. Este método compara la condición actual del activo con respecto a su mejor y peor condición, con tal de establecer una relación que multiplique al valor del activo. Tratando de visualizar los principios anteriores se obtuvieron las gráficas de las Figuras 2.2.1 y 2.2.2 para los indicadores MRI y RD, respectivamente. Para el resto de los indicadores las curvas se encuentran en el Apéndice B.1.

En las figuras se observa una curva llamada “Lineal”, que representa el porcentaje de pérdida para cada valor del indicador, considerando el límite superior del nivel Muy Bueno con 0 % de pérdida y el límite inferior del nivel Malo con un 100 % de pérdida; para los valores intermedios se tiene una pérdida lineal.

También se tiene una curva denominada “Curvilínea”, que intenta representar el comportamiento y tasa de deterioro de los pavimentos en el desempeño de los indicadores técnicos. Al igual que para las curvas “Lineal”, se conecta el límite superior del nivel Muy Bueno (con 0 % de pérdida) con el límite inferior del nivel Malo (100 % pérdida).

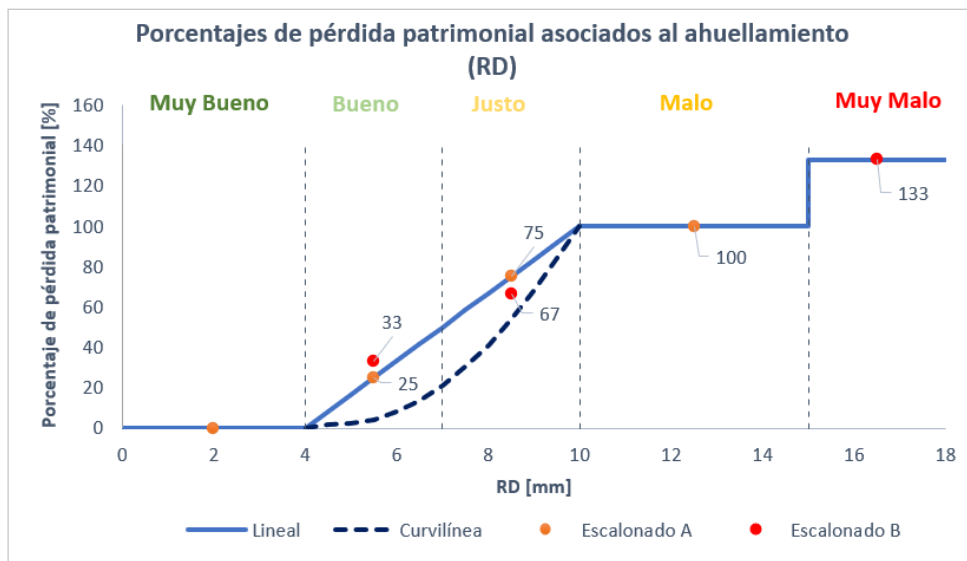
Los puntos de color naranja (Escalonado A) representan la pérdida del valor medio del nivel de desempeño y que será asignado al nivel completo (utilizando pérdida lineal), por ejemplo, en la Figura 2.2.1 para el nivel Bueno, el umbral medio es un MRI de 2.0 m/km, asociando una pérdida equivalente de 25 % para todo el rango de desempeño. Para el nivel Justo, se tiene una pérdida correspondiente al 75 % del costo de la actividad de rehabilitación.

Los puntos de color rojo (Escalonado B) representan una pérdida equitativa para los 3 niveles de desempeño (Bueno, Justo y Malo), correspondiente a un 33 %, 67 % y 100 %, respectivamente. Para el nivel Muy Malo se asignó la misma pérdida equitativa (33 %), definiendo así, un porcentaje para el rango de desempeño de 133 %.



**Figura 2.2.1:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador MRI.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.2.2:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador RD.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la definición del porcentaje de pérdida para el nivel Muy Malo también puede definirse en función del precio unitario utilizado en las multas aplicadas según Manual de Carreteras cuando una actividad de construcción presenta deficiencias. Por ejemplo, cuando una mezcla asfáltica en caliente presenta deficiencias en el espesor, la compactación, lisura y rugosidad de la superficie o en el contenido de asfalto, se consideran los metros cúbicos de mezcla con deficiencias y un PU (precio unitario) equivalente a 1,25 veces el PU correspondiente del presupuesto que rige el contrato (MOP, 2020-c). Es decir, si alguna actividad de rehabilitación corresponde a la aplicación de una mezcla asfáltica en caliente, el porcentaje de pérdida del activo para el nivel de desempeño Muy Malo sería de un 125 %. Esto quiere decir, que al menos debe considerarse un porcentaje de 125 % para este nivel de desempeño.

Todas las propuestas anteriores pueden ser utilizadas para definir la pérdida de valor para los niveles de desempeño, pudiéndose incorporar otras metodologías en función de los objetivos que se quieran alcanzar. Para la presente propuesta de cálculo de valor de pavimentos asfálticos, se utilizarán los porcentajes definidos en la Tabla 2.2.9.

**Tabla 2.2.9:** *Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicadores técnicos de pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{indicador}$ [ % ]
<b>Muy Bueno</b>	0
<b>Bueno</b>	25*
<b>Justo</b>	50*
<b>Malo</b>	100
<b>Muy Malo</b>	200*

(\*) Estos porcentajes son teóricos y se definen para establecer la pérdida de valor por nivel de desempeño

Las razones para definir estos porcentajes se detallan a continuación:

- Para el nivel de desempeño Muy Bueno se define que el pavimento se encuentra en un estado “como nuevo”, por lo que no se requiere de ninguna actividad de rehabilitación. El valor del pavimento sigue siendo su costo histórico.
- Para los niveles Bueno y Justo se consideró un 25 y 50 %, respectivamente, ya que representan el comportamiento del pavimento a través del tiempo, donde su pérdida de desempeño es lenta los primeros años y luego crece a mayor tasa.
- Para el nivel Muy Malo se definió un 200 %, ya que el pavimento se encuentra en el peor estado con respecto al servicio esperado y su condición indica que la gestión del concesionario ha sido deficiente. Una penalización de esta magnitud incentivará a conservar el pavimento en niveles de servicio adecuados, manteniendo el estándar de carretera concesionada que debe entregarse a los usuarios.

Se han considerado los mismos porcentajes para todos los indicadores involucrados, sin embargo, en base a los métodos presentados anteriormente, estos pueden modificarse sin ningún inconveniente.

## 2.3. Actividades de rehabilitación por indicador técnico

A continuación serán detalladas las actividades de rehabilitación que llevan al pavimento a una condición “como nuevo”. El detalle de las partidas se encuentra en el Apéndice B.2.

### 2.3.1. Regularidad longitudinal del pavimento

Esta característica está relacionada a la comodidad que entrega el pavimento a los usuarios y es evaluada a través del Mean Roughness Index (MRI). Es posible asociar esta característica solo a deterioros que se produzcan en la capa más superficial del pavimento (capa de rodadura), y por tanto, al ir aumentando el valor de MRI en una sección, lo que va perdiendo valor es esta capa principalmente.

De acuerdo con el documento de trabajo desarrollado por el Ministerio de Desarrollo Social (MDS, 2017), para corregir un IRI > 3.2 m/km, es necesario realizar una repavimentación que involucre al menos 60 mm de una nueva capa, teniendo como efecto un IRI de 1.8 m/km, como se observa en la Tabla 2.3.1.

**Tabla 2.3.1:** Estándares de trabajos sugeridos para los pavimentos flexibles (Adaptado de MDS, 2017).

Tipo de vía	Volumen	Actividad	Intervención	Diseño	Efectos
Autopistas	Muy alto	Repavimentación 1	IRI > 3.2 [m/km] o Ahuellamiento > 10 [mm]	Espesor nueva capa: 60 [mm]	Irregularidad: 1.8 [m/km] Ahuellamiento: 0 [mm] Textura Sup: 0.6 Res. Deslizamiento: 0.65
		Mortero Asfáltico	Agrietamiento Estructural Total > 5 % o SFC < 0.45	Espesor nueva capa: 10 [mm]	Deducidos

Por tanto, se propone que cuando el indicador MRI alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **repavimentación asfáltica de 60 mm de espesor**. En la Tabla 2.3.2 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado.

**Tabla 2.3.2:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador MRI en pavimentos flexibles.

Nivel de desempeño	MRI (50m) [m/km]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{MRI}$ [%]
Muy Bueno	[0.0, 1.5)	0
Bueno	[1.5, 2.5)	25
Justo	[2.5, 3.5)	50
Malo	[3.5, 5.0)	100
Muy Malo	$\geq 5.0$	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene MRI igual a 2.2 m/km, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25 % del costo de una repavimentación asfáltica de 60 mm de espesor, en [UF].

### 2.3.2. Regularidad transversal del pavimento

Esta característica se evalúa mediante el ahuellamiento o Rut Depth (RD) y se debe principalmente a dos causas. La primera, es por una falta de soporte adecuado de la subrasante, lo que produce un descenso de todo el paquete estructural de pavimento. La segunda, se produce por la deformación de la carpeta asfáltica debido a un inadecuado uso de materiales o una compactación inadecuada durante la construcción, entre otros motivos. Dentro de estas causales de ahuellamiento en un pavimento de espesor grueso, como el de las vías concesionadas de alto tránsito, la más común es la segunda.

De acuerdo con la Tabla 2.3.1, se tiene que la actividad de rehabilitación para un ahuellamiento mayor a 10 mm corresponde a una nueva capa de al menos 60 mm, teniendo como efecto la eliminación total de este deterioro. Por tanto, se propone que cuando el indicador RD alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **repavimentación asfáltica de 60 mm de espesor**. En la Tabla 2.3.3 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado.

**Tabla 2.3.3:** *Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador RD en pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	RD (50m) [mm]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{RD}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	[0.0, 4.0)	0
<b>Bueno</b>	[4.0, 7.0)	25
<b>Justo</b>	[7.0, 10.0)	50
<b>Malo</b>	[10.0, 15.0]	100
<b>Muy Malo</b>	> 15.0	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un RD igual a 8.6 mm, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 50 % del costo de una repavimentación asfáltica de 60 mm de espesor, en [UF].

### 2.3.3. Nivel de ruido de rodadura

El ruido de rodadura se produce de la interacción entre la banda de rodadura del neumático y la superficie de la carretera (FEHRL, 2006). Algunos factores que influyen en el nivel de ruido son la textura superficial, la porosidad, rigidez y capacidad de amortiguación y la edad del pavimento, entre otros. Similar a la regularidad longitudinal y transversal de pavimento, el ruido afecta a la capa más superficial.

De acuerdo con el trabajo de investigación desarrollado por el Laboratorio de Vialidad (Muñoz, 2002) una capa de microaglomerados discontinuos en caliente con espesores entre los 1.0 y 3.5 cm entregan una excelente sensación de confort, reduciendo el ruido de rodadura en 1.5 a 2.0 dB para pavimentos secos y de 2.0 a 4.0 dB para pavimentos mojados. Dado estos espesores de rehabilitación, es posible relacionarlos con una pérdida de valor al sobrepasar el nivel “Justo” del indicador técnico.

En base a esto, cuando el indicador OASI alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada es equivalente al valor de un **microaglomerado discontinuo en caliente de 35 mm de espesor**. En la Tabla 2.3.4 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado.

**Tabla 2.3.4:** *Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador OASI en pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	OASI (200m) [dBA]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{OASI}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 100$	0
<b>Bueno</b>	(100, 102]	25
<b>Justo</b>	(102, 104]	50
<b>Malo</b>	(104,106]	100
<b>Muy Malo</b>	$> 106$	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 200 m tiene un OASI igual a 103 dBA, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 50% del costo de un microaglomerado discontinuo en caliente de 35 mm de espesor, en [UF]. En caso de considerarse secciones de menor longitud, por ejemplo, de 50 m, cada subsección tendrá el mismo nivel de desempeño de los 200 m reportados.

### 2.3.4. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y los neumáticos, esta adherencia va disminuyendo en el tiempo por efecto del pulimiento causado por el tránsito. La fricción depende principalmente de la velocidad de circulación de los vehículos, de la presencia de lubricantes o contaminantes y de la textura superficial del pavimento (microtextura y macrotextura). En función de lo anterior, a medida que se va perdiendo resistencia al deslizamiento, es la capa más superficial la que va perdiendo valor.

De acuerdo con la Tabla 2.3.1 (MDS, 2017), una solución para un SFC equiv.  $< 0.45$  corresponde a una capa nueva de 10 mm de espesor, por tanto, se propone que cuando el indicador SFC equiv. alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de un **microaglomerado discontinuo en caliente de 10 mm de espesor**. En la Tabla 2.3.5 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado.

**Tabla 2.3.5:** *Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador SFC equiv. en pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	SFC equiv. (50m) [-]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{SFC}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	(0.65, 1.00]	0
<b>Bueno</b>	(0.55, 0.65]	25
<b>Justo</b>	(0.40, 0.55]	50
<b>Malo</b>	(0.20, 0.40]	100
<b>Muy Malo</b>	[0.00, 0.20]	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene SFC equiv. igual a 0.62, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25 % del costo de un microaglomerado discontinuo en caliente de 10 mm de espesor, en [UF].

### 2.3.5. Agrietamiento

El agrietamiento del pavimento tiene dos mecanismos de generación. El primero (caso típico), comienza al fondo de la capa asfáltica y se propaga hacia la superficie, es decir, cuando las grietas son visibles significa que la carpeta está agrietada en todo su espesor. El segundo caso, se presentan grietas que comienzan en la superficie. En ambas situaciones es necesaria la obtención de un testigo de pavimento para determinar el mecanismo de formación.

Considerando que el mecanismo típico de deterioro contempla una carpeta agrietada en todo su espesor, se propone que para este indicador se evalúe el valor con respecto a todo el espesor de material asfáltico, ya sea carpeta de rodadura, capas intermedias y base asfáltica, si fuere el caso. Por tanto, se propone que cuando el indicador porcentaje de agrietamiento alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **repavimentación asfáltica de todas las capas** que sean de tipo asfálticas en la longitud total de la sección, es decir, 50 m. En la Tabla 2.3.6 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado.

**Tabla 2.3.6:** *Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador Porcentaje de agrietamiento en pavimentos flexibles.*

Nivel de desempeño	Agriet. (50m) [%]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{Agriet.}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	[0.0, 4.0)	0
<b>Bueno</b>	[4.0, 7.0)	25
<b>Justo</b>	[7.0, 10.0)	50
<b>Malo</b>	[10.0, 15.0]	100
<b>Muy Malo</b>	> 15.0	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un porcentaje de agrietamiento igual a 4.5 %, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25 % del costo de una repavimentación a espesor total de capas asfálticas, en [UF].

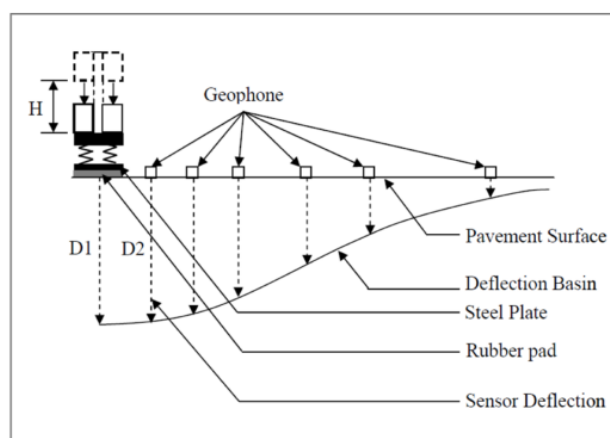
### 2.3.6. Deflexiones del pavimento

En el caso de las deflexiones del pavimento, no existen estudios o prácticas que relacionen los indicadores técnicos con actividades de rehabilitación de manera directa como ocurre con los indicadores antes desarrollados. Dentro de los desafíos de este trabajo de investigación se incluye la incorporación de estas características como parte de la valoración, por tanto, se hace necesario estudiarlas en mayor detalle.

La deflexión es el valor del desplazamiento o deformación elástica (recuperable) vertical que sufren los pavimentos al ser solicitados por las cargas que impone el tránsito. El valor depende de una serie de factores, entre los que se destacan: la rigidez y espesor del pavimento, su temperatura y el soporte del suelo de fundación (Contreras, 2015). En general, para pavimentos rígidos y flexibles, las deflexiones tienen variadas aplicaciones:

- Evaluar la capacidad de soporte de calles, carreteras, aeropuertos y otras superficies.
- Evaluación de la transferencia de carga y detección de vacíos en pavimentos de hormigón.
- Control de calidad y análisis de tramos de prueba.
- Sectorización de zonas dañadas.
- Dimensionamiento de refuerzos.

El cuenco de deflexiones es el conjunto de deflexiones que reflejan la deformada de la superficie de un pavimento, registradas por todos los sensores de un deflectómetro de impacto (FWD) en el momento del ensayo. El FWD es un equipo de ensayo no destructivo que simula mediante un impacto vertical la carga de un vehículo pesado sobre un pavimento, midiendo la deformación vertical elástica a diferentes distancias del punto de impacto. En la Figura 2.3.1 se observa un esquema del cuenco de deflexiones.



**Figura 2.3.1:** Cuenco de deflexiones resultante del ensayo de deflectometría de impacto.

Fuente: Kavussi et al. (2017).

Los indicadores técnicos que fueron desarrollados en el proyecto anterior (Sección 1.2.1) como desarrollo preliminar para la evaluación de la capacidad estructural son los detallados en la Tabla 2.3.7:

**Tabla 2.3.7:** *Indicadores técnicos para la evaluación de deflexiones del pavimento (Burgos, 2019).*

Indicador	Fórmula	Indicador estructural
Deflexión máxima	$D_0$ , medición al centro de la carga	Reflejo de la condición de todas las capas estructurales con una contribución del 70% de la subrasante.
Índice de capa base, BLI	$BLI = D_0 - D_{300}$	Reflejo de la condición estructural de la capa base o capas asociadas a la profundidad evaluada (hasta los 300 mm aprox.).
Índice de capa media, MLI	$MLI = D_{300} - D_{600}$	Reflejo de la condición estructural de la subbase o capa asociada a la profundidad evaluada (desde 300 hasta 600 mm aprox.).
Índice de capa inferior, LLI	$LLI = D_{600} - D_{900}$	Reflejo de la condición estructural de las capas bajas y subrasante o capa asociada a la profundidad evaluada (desde 600 hasta 900 mm aprox.).

$D_i$  :Deflexión a "i" mm del centro de aplicación de la carga

Como se mencionó previamente, a pesar de que estos indicadores son utilizados para caracterizar el estado estructural del pavimento, no son comúnmente empleados para definir actividades de rehabilitación. En el Apéndice D.1 se presenta una revisión de dos estudios donde se definieron planes de rehabilitación a partir de la relación entre indicadores estructurales y otros indicadores técnicos de pavimentos flexibles. Con esta revisión, se definió una metodología preliminar para incluir estos indicadores en un método de valoración, pero que debe ser validada por expertos para su uso en el contexto nacional.

En la Sección 2.3.7 es desarrollada otra propuesta de valoración mediante el número estructural efectivo proveniente de la deflectometría de impacto, ya que es un indicador comúnmente utilizado en la evaluación estructural de pavimentos y que se puede ajustar a la metodología ya presentada para los demás indicadores. A pesar de que el número estructural no es un indicador que haya sido utilizado para evaluar el nivel de servicio de una concesión (Delgadillo et al., 2020), será incorporado en el método ya que permite considerar la pérdida de capacidad estructural de las capas base y subbase, con el fin de evaluar todos los componentes de un pavimento.

### 2.3.7. Número estructural efectivo

Tal como se mencionó anteriormente, las deflexiones del pavimento se utilizan para evaluar la capacidad de soporte de los caminos, donde una herramienta utilizada es el retroanálisis. El retroanálisis es un proceso de cálculo donde se obtienen las propiedades elásticas de los materiales constitutivos de un pavimento a partir de las deflexiones, en particular, el módulo de elasticidad (o de resiliencia).

En el caso de pavimentos flexibles, el modelo considera un proceso iterativo en el cual se utiliza el valor de las deflexiones obtenidas mediante la deflectometría, las características del deflectómetro (carga aplicada y tamaño del plato de carga) y el espesor total del pavimento. Con estas características se obtiene por iteración el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) y el módulo elástico efectivo de todo el conjunto de capas del pavimento ( $E_p$ ). La Ecuación 2.3.1 permite relacionar la deflexión máxima  $D_0$  con los otros parámetros (AASHTO, 1993).

$$D_0 = 1.5qa \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right\} \quad (2.3.1)$$

Donde:

$D_0$  : Deflexión bajo el plato de carga, en [cm].

$q$  : Presión del plato de carga, en [MPa].

$a$  : Radio del plato de carga, en [cm].

$M_r$  : Módulo de resiliencia retrocalculado, en [MPa].

$E_p$  : Módulo efectivo de todas las capas del pavimento sobre la subrasante, en [MPa].

$D$  : Espesor total de las capas de pavimentos sobre la subrasante, en [cm].

En la Ecuación 2.3.2 se muestra la expresión del módulo resiliente en función de la forma del cuenco de deflexiones:

$$M_r = \frac{2.4 \cdot P}{D_r \cdot r} \quad (2.3.2)$$

$$r > 0.7 \sqrt{a^2 + \left( D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}$$

Donde:

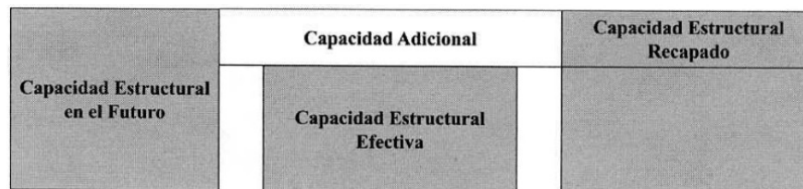
$P$  : Carga aplicada, en [kN].

$r$  : Distancia desde el centro del plato de carga al transductor “r”, en [cm].

$D_r$  : Deflexión a la distancia “r” del centro del plato de carga, en [cm].

El método descrito corresponde al retroanálisis AASHTO 93 que es ampliamente utilizado en Chile en ensayos de deflectometría de impacto. Otras técnicas de retrocálculo son LUKANEN (Lukanen & Han, 1992), YONAPAVE (Hoffman, 2003) y ROHDE (Rohde, 1994).

El método AASHTO 93 es utilizado principalmente para el diseño de recapados asfálticos, que tienen por finalidad agregar capacidad estructural adicional a un pavimento rígido o flexible para prolongar la vida de diseño. La Figura 2.3.2 ilustra el concepto anterior.



**Figura 2.3.2:** Aporte estructural de un recapado asfáltico sobre un pavimento rígido o flexible.

Fuente: de Solminihac et al. (2018).

En el caso de un recapado de asfalto sobre un pavimento flexible, el espesor del recapado considera la estimación del aporte estructural requerido por el recapado ( $NE_{recapado}$ ), obtenido como la diferencia entre la capacidad estructural futura ( $NE_{futuro}$ ) y la capacidad estructural efectiva del pavimento ( $NE_{efectivo}$ ), como se muestra en la Ecuación 2.3.3:

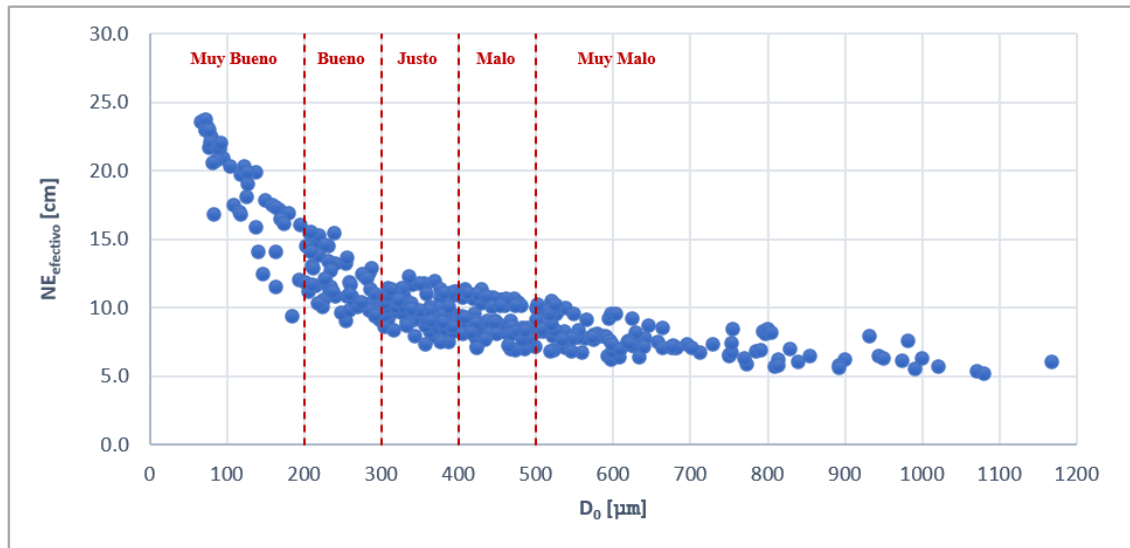
$$NE_{recapado} = NE_{futuro} - NE_{efectivo} \tag{2.3.3}$$

En el caso de las capas asfálticas, la capacidad estructural se calcula en términos del Número Estructural, donde el  $NE_{efectivo}$  se obtiene mediante la Ecuación 2.3.4 y el  $NE_{futuro}$  se obtiene del método de diseño de pavimentos asfálticos definido en el Manual de Carreteras (MOP, 2019-b).

$$NE_{efectivo} = 0.02364D \sqrt[3]{E_p} \tag{2.3.4}$$

Como se puede apreciar, el método AASHTO 93 permite definir una actividad de rehabilitación del pavimento (recapados asfálticos) en función de uno de los indicadores técnicos definidos para las deflexiones del pavimento, la deflexión máxima  $D_0$ . Sin embargo, esta metodología requiere de otros parámetros

para su obtención y no considera los indicadores BLI, MLI y LLI. En la Figura 2.3.3 se puede observar la relación entre la deflexión máxima y el número estructural efectivo para datos reales de una carretera chilena con más de 20 millones de EE de diseño.



**Figura 2.3.3:** Relación entre deflexión máxima y el número estructural efectivo del pavimento.

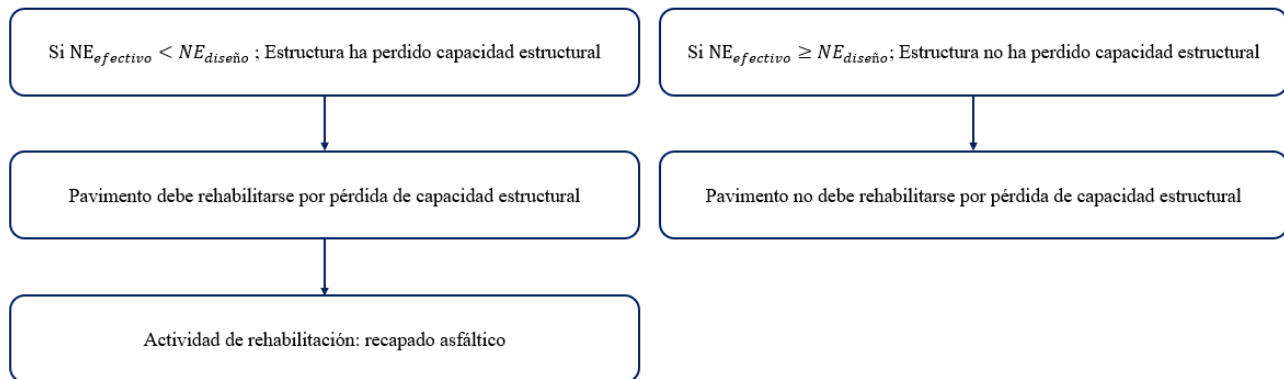
Fuente: Elaboración propia.

En general, se tiene que a mayores deflexiones bajo el plato de carga, menor es la capacidad estructural efectiva del pavimento, por tanto, si se tiene una capacidad estructural futura definida ( $NE_{futuro}$ ), a menor número estructural efectivo ( $NE_{efectivo}$ ), mayor debe ser la capacidad estructural del recapado, necesiéndose un mayor espesor.

Por otra parte, en el gráfico se delimitaron los niveles de desempeño para el indicador  $D_0$  (Tabla 2.2.3), donde se observa que para cada nivel existe un rango de número estructural, siendo este, más acotado para las deflexiones mayores. Sin embargo, el número estructural efectivo depende de los parámetros involucrados en el método de cálculo y no puede generalizarse para cualquier carretera. Definir un espesor de recapado (actividad de rehabilitación) con esta metodología también requiere conocer el número estructural futuro, que depende de los Ejes Equivalentes que tendrá la vía, lo cual tampoco puede generalizarse para cualquier carretera. No obstante, se puede utilizar este método para evaluar la pérdida de capacidad estructural del pavimento con respecto a su condición original, permitiendo evaluar su pérdida de valor.

### 2.3.7.1. Definición de actividad de rehabilitación

Si se compara el  $NE_{efectivo}$  con el  $NE_{diseño}$  se puede obtener la pérdida de capacidad estructural del pavimento con el paso del tiempo, permitiendo definir una actividad de rehabilitación que lleve al pavimento a su estado “como nuevo”. En función de lo anterior se tiene el siguiente esquema:



**Figura 2.3.4:** Comparación y línea de acción entre  $NE$  efectivo y  $NE$  diseño del pavimento.

Fuente: Elaboración propia.

La actividad de rehabilitación que ha sido considerada, en primera instancia, es un recapado asfáltico, ya que se acostumbra a emplear a partir de la deflectometría de impacto. Es importante aclarar que esta actividad considera agregar una nueva capa de pavimento que mejora la capacidad estructural, sin embargo, es una actividad subdimensionada dado que no puede realizarse sin modificar el diseño geométrico y rasante del proyecto.

A pesar de lo anterior, se ha decidido seleccionar esta actividad ya que el objetivo del método de valoración es determinar una pérdida equivalente al costo de llevar al pavimento a su estado “como nuevo”, y un recapado asfáltico a partir de la diferencia entre números estructurales, restaura la capacidad estructural inicial del pavimento. Por medio de esta actividad de rehabilitación se puede cuantificar económicamente la pérdida de capacidad estructural que ha sufrido el pavimento, y por consecuencia, cuantificar el valor del activo.

El recapado asfáltico ha sido escogido debido a la facilidad de utilizar el número estructural de manera directa, sin complejizar ni entrar en supuestos sobre la condición estructural de las capas base y subbase, de la cual no se puede tener información a menos que se extraigan testigos del pavimento al momento de la evaluación mediante el equipo FWD. Para definir el espesor de recapado se utiliza la siguiente expresión:

$$h_{rec} = \frac{NE_{diseño} - NE_{efectivo}}{0.43} \quad (2.3.5)$$

Donde:

$h_{rec}$  : Espesor de recapado necesario para restablecer el  $NE_{diseño}$ , en [cm].

$NE_{diseño}$  : Número estructural de diseño, según lo dispuesto en la sección 3.604 del Manual de Carreteras (MOP, 2019-b), en [cm].

$NE_{efectivo}$  : Número estructural efectivo proveniente del ensayo de deflectometría de impacto (Ecuación 2.3.4), en [cm].

0.43 : Coeficiente estructural de concreto asfáltico de superficie, según Tabla 3.604.107.A del Manual de Carreteras (MOP, 2019-b).

Para calcular el costo de rehabilitación por pérdida de capacidad estructural se definen secciones de 50 m de longitud, donde las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada en esta actividad son detalladas en la Tabla 2.3.8 y han sido itemizadas según Manual de Carreteras, Volumen 5 (MOP, 2020-d). Los precios unitarios de cada partida deben ser definidos en el contrato de licitación correspondiente. El ancho de pista y el espesor de recapado se definen como “b” y “ $h_{rec}$ ”, respectivamente, y todas las dimensiones se encuentran en [m].

**Tabla 2.3.8:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación por deflectometría de impacto.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación*	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{rec} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

(\*) En función del espesor obtenido.

La partida de “imprimación” se agrega si se cumple el siguiente caso:

$$h_{rec} \geq h_{CA}$$

Donde  $h_{CA}$  es el espesor total de capas asfálticas del pavimento, en [cm].

Cabe destacar que, el precio unitario de las partidas involucra el suministro de todos los materiales, equipos y mano de obra necesarios, incluso su transporte y colocación, compactación, terminación y demás trabajos y actividades requeridos para cumplir con lo especificado en la correspondiente sección del Manual de Carreteras.

En la Tabla 2.3.8 se puede observar que ha sido considerada la partida “Fresado de Pavimento Asfáltico”, pero el espesor determinado se obtiene a partir del espesor de recapado que se coloca sobre el pavimento para agregar capacidad estructural. Esta partida ha sido considerada por la restricción de ejecutar la actividad de rehabilitación en el pavimento, sin embargo, está subestimando la recuperación de capacidad estructural por medio del número estructural de diseño, ya que si se realiza un fresado y recapado de espesor  $h_{rec}$  no se vuelve a la condición de “como nuevo”.

Ante una pérdida de capacidad estructural, siempre se requerirá colocar un espesor de mezcla asfáltica mayor a la que se frese, ya que el espesor no fresado tendrá un número estructural inferior al original de diseño y esta deficiencia no se suple con la remoción y reposición de un mismo espesor de mezcla asfáltica. En consecuencia, siempre se debería colocar un espesor de recapado mayor que el fresado, lo cual altera la rasante del proyecto.

La definición del espesor exacto de fresado y recapado asfáltico que cumpla con no alterar la rasante del proyecto y que restablezca el número estructural de diseño es difícil de calcular y requiere de conocer el aporte de capacidad estructural de las diferentes capas de pavimento, para lo cual se necesitan extracciones de testigos y realizar ensayos de laboratorio. Una metodología de cálculo para determinar un espesor más exacto es presentada en el Apéndice D.2, pero es menos precisa y tiene un grado de incertidumbre mayor a la formulación anteriormente presentada.

Sabiendo que el costo de rehabilitación en función del espesor de recapado está subestimando la pérdida de valor del activo, es necesario determinar cuánta pérdida menos se está calculando. A partir de la metodología presentada en el Apéndice D.2 se calcula el valor del activo utilizando los datos del caso de estudio y se compara con esta metodología considerando el espesor  $h_{rec}$  (Ecuación 2.3.5), cuyos resultados se encuentran en el Capítulo 3. La comparación indica que el costo de rehabilitación por pérdida de capacidad estructural considerando una metodología menos precisa (pero más exacta), es alrededor de 5 veces mayor a los costos solo por espesor de recapado. Si se comparan los resultados aplicando el método de valoración incluyendo los demás indicadores técnicos, los costos de rehabilitación son en promedio el doble que utilizando la metodología propuesta. La aplicación y comparación de resultados entre ambas propuestas se encuentran en el Apéndice E.

Los factores anteriores se obtienen con los datos del caso de estudio por lo que podrían ser diferentes en otras carreteras, siendo necesario contar con información de otras rutas nacionales para poder acotar estos valores y así tener un método de valoración que sea preciso y exacto al mismo tiempo, de modo tal que pueda ser incorporado sin incertidumbres en las bases de licitación.

Una vez definida la actividad de rehabilitación para considerar la capacidad estructural dentro de la valoración del activo, es relevante considerar la puntualidad de las mediciones del deflectómetro de impacto y su representatividad en los tramos evaluados. De la literatura revisada se conoce que el número estructural efectivo es retrocalculado para cada punto del ensaye, y que establecer un valor representativo de una sección de carretera depende de la cantidad de mediciones que se realicen.

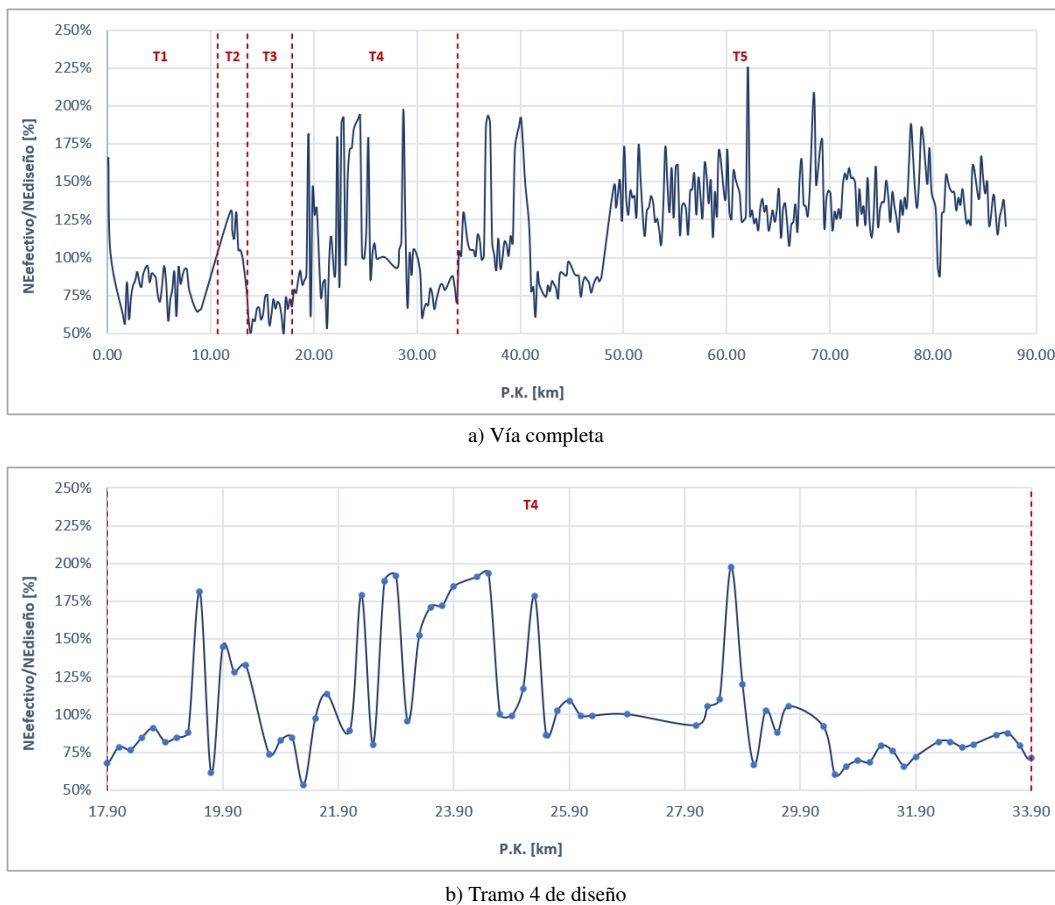
En la Sección 2.603.205(3) del Manual de Carreteras (MOP, 2020-g) denominada “prospección para rehabilitación de pavimentos”, se indica que los ensayos deben realizarse según una secuencia más o menos fija en cuanto cantidad y posición; para condiciones normales se recomienda realizar 10 mediciones por km y por calzada (con un mínimo de 8 mediciones por km), alternando y desfasando las mediciones entre una y otra pista. Revisiones de otros estudios (UTFSM, 2019-d) concluyeron que la evaluación estructural a nivel de proyecto debe realizarse en intervalos de al menos 50 m por pista, propuesta realizada para los indicadores de deflectometría (Apéndice A.6).

Una vez determinada la cantidad de mediciones puntuales a nivel de proyecto, se puede evaluar el pavimento a lo largo de la carretera y subdividirlo en sectores de igual resistencia estructural, con un valor característico de NE efectivo. Lo anterior se debe a que el valor puntual de un ensayo no es representativo de la sección de 50 m donde fue realizado, sin embargo, considerar una mayor cantidad de datos puntuales puede definir un valor que represente adecuadamente la capacidad estructural de un sector de mayor longitud. Este procedimiento se conoce como tramificación o segmentación estructural. Por otra parte, es importante mencionar que el número estructural de diseño no necesariamente es un valor único para un proyecto, sino que depende de los tramos de diseño que tenga una carretera, en consecuencia, la tramificación realizada debe ser consistente con estos.

En la Figura 2.3.5 se observa el comportamiento del ratio  $NE_{\text{efectivo}}/NE_{\text{diseño}}$  para datos reales de una carretera chilena. Se ha propuesto graficar mediante este parámetro con el objetivo de normalizar las mediciones. La vía tiene cinco tramos de diseño (indicados en la gráfica superior), con sus respectivos números estructurales de diseño. Los valores graficados corresponden a mediciones cada 200 m en una de las pistas. Al analizar las figuras pueden apreciarse al menos dos aspectos:

- Es necesario realizar una tramificación y determinar un valor representativo para cada sección de carretera. Utilizar valores puntuales de número estructural efectivo no es adecuado al menos, para realizar una valoración patrimonial. La tramificación debe ser consistente con los tramos de diseño.
- La cantidad de mediciones que se tengan es fundamental para determinar la longitud de los sectores homogéneos. Además, permite una mayor confiabilidad en el valor representativo.

El desafío es entonces, definir la longitud de estos sectores homogéneos y el valor que será representativo (valor promedio, percentil 85, etc.) para asignar a cada una de las secciones de 50 m que componen los sectores homogéneos de capacidad estructural.



**Figura 2.3.5:** Comportamiento del ratio  $NE_{\text{efectivo}}/NE_{\text{diseño}}$  para datos reales de una carretera chilena.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.7.2. Métodos de tramificación

Para establecer sectores homogéneos y calcular el número estructural efectivo que caracterice la capacidad estructural de cada uno, se presentan tres metodologías que serán desarrolladas en este estudio:

- a) Definir sectores homogéneos de una longitud constante a lo largo de toda la carretera, por ejemplo, de 1 km, y que sean independiente de la longitud de los tramos de diseño.
- b) Establecer sectores homogéneos de una longitud constante pero en función de la longitud de los tramos de diseño de la vía. Por ejemplo, para un tramo de diseño de 16 km se definen sectores de 2 km de longitud y para un tramo de diseño de 15 km se definen tramos de 3 km de longitud.
- c) Utilizar el método de tramificación de diferencias acumuladas desarrollado en el anexo J de la guía de AASHTO (AASHTO, 1993), a partir de una deflectometría inicial de la carretera.

A continuación, serán explicadas en mayor detalle cada una de las metodologías de tramificación propuestas, con sus respectivas ventajas y desventajas. Además, serán presentados ejemplos con datos reales de una carretera chilena para visualizar de mejor manera los métodos y los efectos de cada uno. Es importante mencionar que existen otros algoritmos de segmentación, entre los cuales se encuentran (Vargas-Tejeda et al., 2008):

- Método de las diferencias absolutas
- Método LCPC
- Método de las sumas acumuladas (CUSUM)
- Modelos autorregresivos
- Segmentación bayesiana

#### **a) Sectores de longitud constante**

Este método consiste en dividir cada tramo de diseño en sectores de longitud constante y agrupar todas las mediciones del ensaye de deflectometría para obtener el valor característico de número estructural efectivo.

Tal como se mencionó, la longitud de cada sector será constante e igual en cada tramo de diseño. Para la longitud de los sectores se recomienda que sean múltiplos de 1 km, ya que es una unidad utilizada típicamente en la construcción y evaluación de pavimentos. Dado lo anterior, si se realizan las mediciones de deflectometría cada 50 m pista, en 1 km se tienen 20 datos puntuales de número estructural efectivo.

Una vez definida la longitud de los sectores, el valor representativo de número estructural efectivo se puede obtener a partir del promedio de los datos o con un análisis estadístico más detallado. Los criterios para definir este valor serán presentados más adelante.

#### **b) Sectores de longitud constante en función de tramos de diseño**

Este método es similar al anterior pero se diferencia en que la longitud de los sectores es definida a partir de la longitud de cada tramo de diseño. Se propone este criterio para que todos los sectores de un tramo de diseño tengan la misma longitud y cantidad de datos puntuales.

Esta metodología de tramificación se propone para tramos de diseño con longitudes, por ejemplo de 10.7 km o 5.5 km, que al dividir en múltiplos de 1 km, quedan sectores con longitud menores y menor cantidad de mediciones.

#### **c) Sectores por método de diferencias acumuladas**

El método de diferencias acumuladas se utiliza principalmente para el diseño de rehabilitaciones de pavimento y consiste en definir tramos homogéneos a partir de un procedimiento analítico que se encuentra detallado en el apéndice J de la guía AASHTO (AASHTO, 1993).

Este método se basa en el simple hecho de que cuando la variable  $Z_c$  (definida como la diferencia entre el área bajo la curva de respuesta a cualquier distancia y el área total desarrollada a partir de la respuesta promedio general del proyecto en la misma distancia) se traza como una función de la distancia a lo largo del proyecto, los límites de los sectores homogéneos ocurren en el lugar donde las pendientes ( $Z_c$  vs  $X$ ) cambian de signo.

La guía también comenta que el ingeniero debe evaluar la longitud resultante de cada sector homogéneo para determinar si dos o más unidades deben combinarse por consideraciones prácticas de construcción y razones económicas. La combinación de sectores debe realizarse en relación con la sensibilidad de los valores medios de respuesta para cada unidad sobre el desempeño de futuros diseños de rehabilitación.

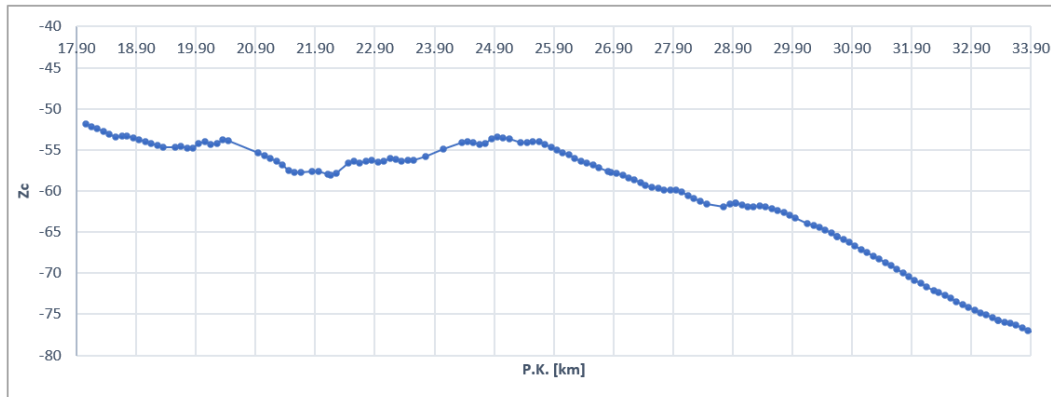
El Manual de Carreteras en la Sección 8.502.6 también propone utilizar este método para definir sectores homogéneos en el análisis de deflexiones en recapados asfálticos. Además, se debe complementar el análisis con una prueba de hipótesis de igualdad de las medias (MOP, 2020-h).

A pesar de que este método es usado principalmente para el diseño de rehabilitaciones, se propone como metodología para definir sectores homogéneos en el análisis de datos de número estructural efectivo. El objetivo es poder determinar los sectores a partir de una “deflectometría inicial” que puede definirse luego de construirse algún tramo de diseño o cuando se apruebe la puesta en servicio provisoria de las obras. Una vez definidos estos sectores, se mantendrán constantes a lo largo de todos los años de evaluación de la concesión. Se escoge una deflectometría inicial dado que se quiere evaluar la pérdida de capacidad estructural con respecto a su condición “como nuevo”.

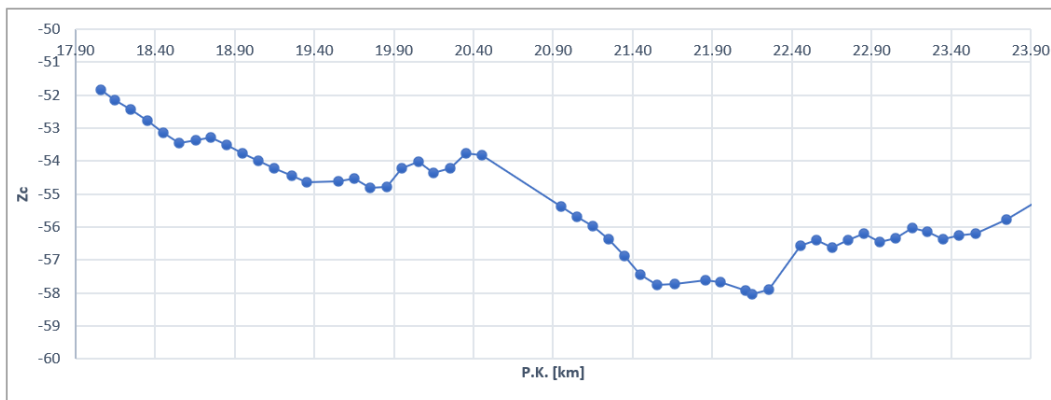
Debido a que el método de diferencias acumuladas es un proceso analítico que requiere del criterio ingenieril, a continuación, serán detallados los pasos propuestos para su aplicación. Los criterios considerados se basan en aspectos estadísticos utilizados comúnmente en el diseño de pavimentos (MOP, 2019-b) y en aspectos prácticos relacionados a la construcción de pavimentos. La base de datos utilizada corresponde a mediciones de deflectometría de impacto cada 200m-pista de una carretera chilena.

1. La tramificación se debe realizar por pista y los datos utilizados deben corresponder a una deflectometría que represente adecuadamente la condición estructural original del pavimento.
2. Por cada tramo de diseño se calcula el  $NE_{efectivo}$  promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Los valores de  $NE_{efectivo}$  superiores al promedio más dos desviaciones estándar, se desechan y no entran en el cálculo de la variable  $Z_c$ . Sin embargo, si existen datos superiores al promedio más dos desviaciones estándar que se encuentran continuos en al menos 1 km, no se deben desechar, ya que pueden representar un sector homogéneo de capacidad estructural mayor.
3. Una vez trabajada la base de datos, se aplica el procedimiento para determinar la variable  $Z_c$  del método de diferencias acumuladas. El cálculo se debe realizar considerando todos los valores que cumplieron los criterios del paso anterior.
4. Por cada tramo de diseño se deben analizar los sectores homogéneos a partir del cambio de pendientes. Es posible que por cambios de pendientes se establezcan sectores de longitudes menores a 1 km, por lo que es necesario considerar aspectos constructivos para redefinir estos. En la Figura 2.3.6 (a) se visualiza el comportamiento de la variable  $Z_c$  para un tramo de diseño de 16 km. En la Figura b se presenta el detalle para los primeros 3 km del tramo.  
Como se observa, existen cambios de pendientes que determinarían sectores homogéneos de longitudes menores, por ejemplo 0.2 km, que se debe principalmente a la puntualidad de los datos y no a la capacidad estructural característica del pavimento. En estos casos se recomienda definir sectores homogéneos omitiendo estos cambios de pendiente y estableciendo como longitud mínima 1 km.

- Una vez definidos los sectores homogéneos se realizan pruebas de hipótesis de igualdad de las medias para determinar si dos o más sectores pueden agruparse como uno solo. La prueba de hipótesis consiste en comparar dos valores de  $NE_{efectivo}$  promedio y evaluar si existe una diferencia estadísticamente significativa. La prueba se realiza usualmente con una significancia de  $\alpha = 5\%$ .



a) Totalidad tramo 4 de diseño



b) Detalle primeros tres kilómetros de tramo 4

**Figura 2.3.6:** Comportamiento variable  $Z_c$  para datos reales de una carretera chilena.

Fuente: Elaboración propia.

Revisado los tres métodos de tramificación propuestos para determinar el número estructural efectivo es necesario definir qué valor característico se empleará para el cálculo de espesor de recapado (Ecuación 2.3.5). Considerando que el objetivo es valorizar la capacidad estructural de una carretera, se propone calcular, por sector homogéneo, el  $NE_{efectivo}$  promedio y la desviación estándar. Los valores superiores al promedio más dos desviaciones estándar se deben eliminar del análisis, para volver a calcular el valor de  $NE_{efectivo}$  promedio que se empleará en el índice de valoración. Los valores inferiores no se deben eliminar del cálculo.

El motivo principal para establecer los criterios anteriores es evaluar la homogeneidad de la capacidad estructural de la vía, sabiendo que datos puntuales máximos distorsionan el valor representativo. Conceptualmente estos datos extremos representan secciones de pavimento que pueden haber sido mejor construidas en comparación a otras y que no se quieren “premiar” al promediar con otras secciones. Por el contrario, los valores mínimos no se extraen del análisis porque representan zonas de debilidad estructural que pueden necesitar una rehabilitación que eleve el nivel de servicio a los usuarios y que deben entrar en el cálculo de capacidad estructural. Los conceptos anteriores se basan, igualmente, en los criterios de diseño de pavimentos según el Manual de Carreteras (MOP, 2019-b).

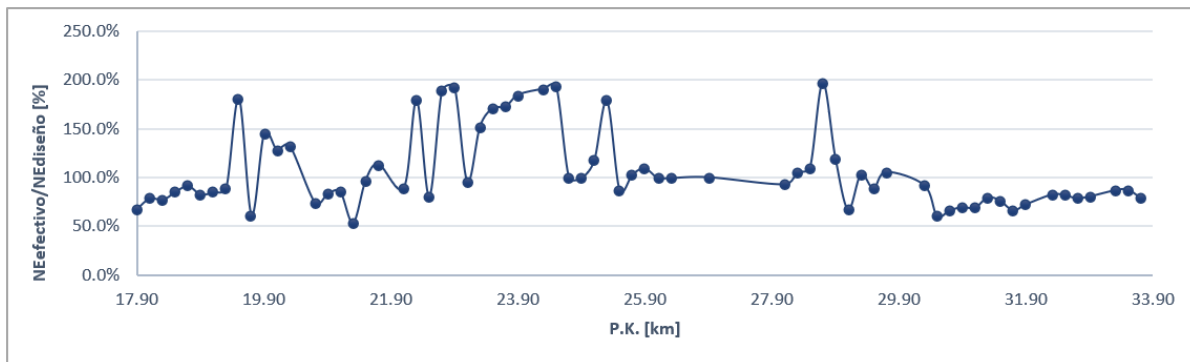
A modo de ejemplo, en la Figura 2.3.7 se visualiza el comportamiento del ratio  $NE_{efectivo}/NE_{diseño}$ , para los diferentes métodos de tramificación. Los datos evaluados corresponden al tramo 4 de diseño de una carretera, el cual tiene una longitud de 16 km. En la figura (a), se presentan los datos puntuales; en la figura (b), se realiza una tramificación constante cada 1 km; en la figura (c), se realiza una tramificación constante cada 4 km, y en la figura (d), se presenta la tramificación por el método de diferencias acumuladas.

Se ha escogido tramificar cada 1 y 4 km para comparar los resultados al incluir más valores puntuales en el análisis. Si se considera que los datos que se tienen corresponden a mediciones cada 200 m, en 1 km solo se tienen 5 datos para representar la capacidad estructural del sector; por el contrario, si se agrupan las mediciones de 4 km, se tienen más datos para definir el valor característico. En función de lo anterior, es importante que la longitud de los sectores sea definida a partir de las mediciones que se tengan, con tal de que el valor de NE efectivo promedio sea representativo y con una alta confiabilidad.

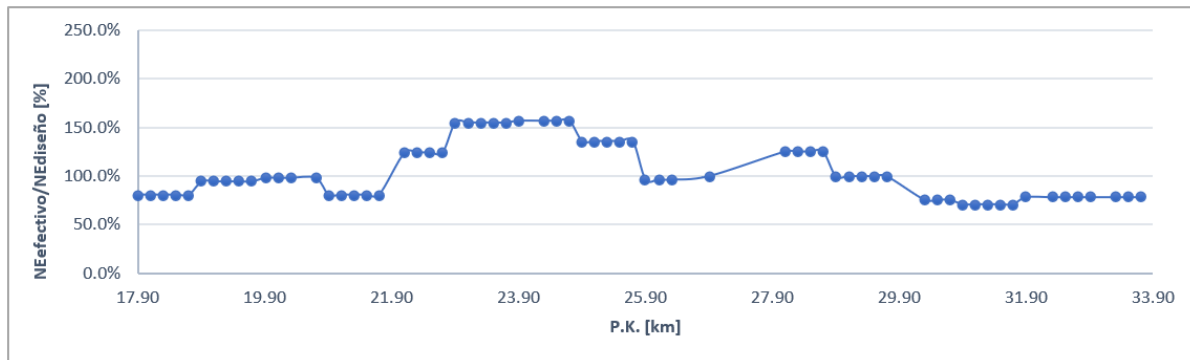
En la Tabla 2.3.9 se detallan los sectores homogéneos determinados a partir del método de diferencias acumuladas, incluyendo sus longitudes. Para cada una de las tramificaciones se eliminaron los datos sobre el promedio más dos desviaciones estándar y luego se obtuvo el valor característico ( $NE_{efectivo}$  promedio), que se le asigna a cada sección de 200 m que constituye el sector. El detalle de los valores de cada gráfico se encuentra en el Apéndice B.3.

**Tabla 2.3.9:** Tramificación por método de diferencias acumuladas Tramo 4.

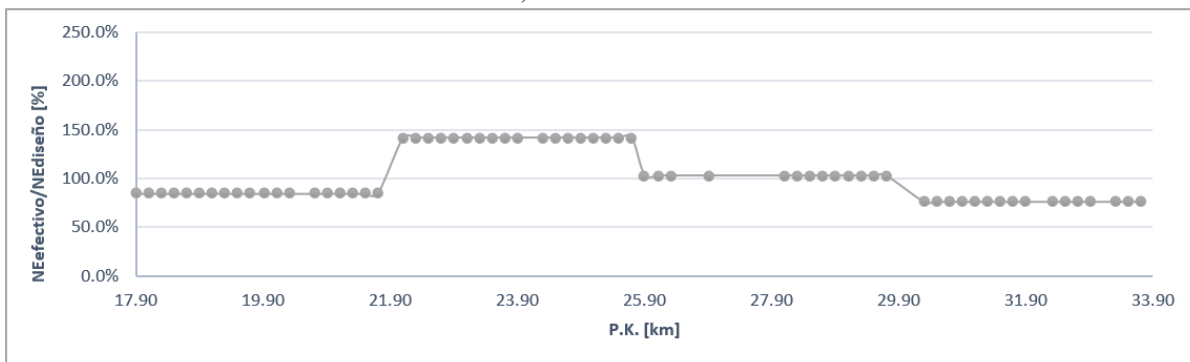
Sector homogéneo	P.K. [km]	Longitud [km]
1	17.900-22.900	5.0
2	22.900-25.700	2.8
3	25.700-29.700	4.0
4	29.700-33.900	4.2



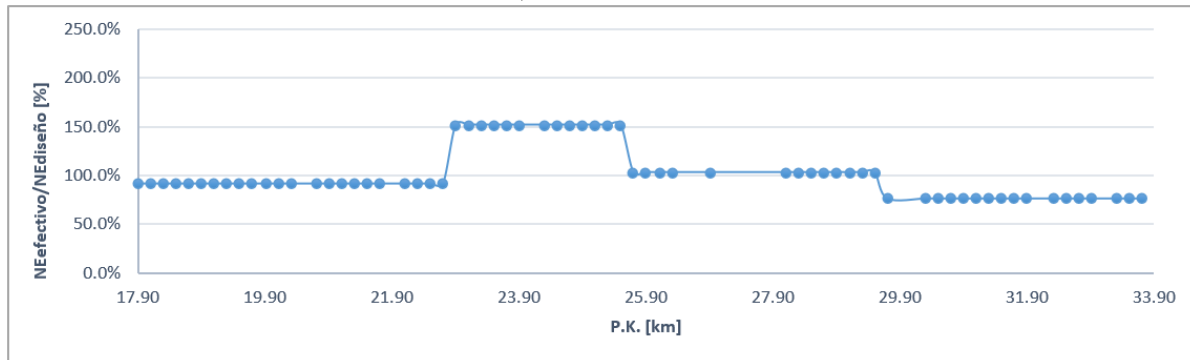
a) Datos puntuales



b) Tramificación 1km



c) Tramificación 4km



d) Tramificación método diferencias acumuladas

**Figura 2.3.7:** Comparación de métodos de tramificación para datos reales de una carretera chilena.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla 2.3.10 se resumen las ventajas y desventajas de utilizar cada método de tramificación.

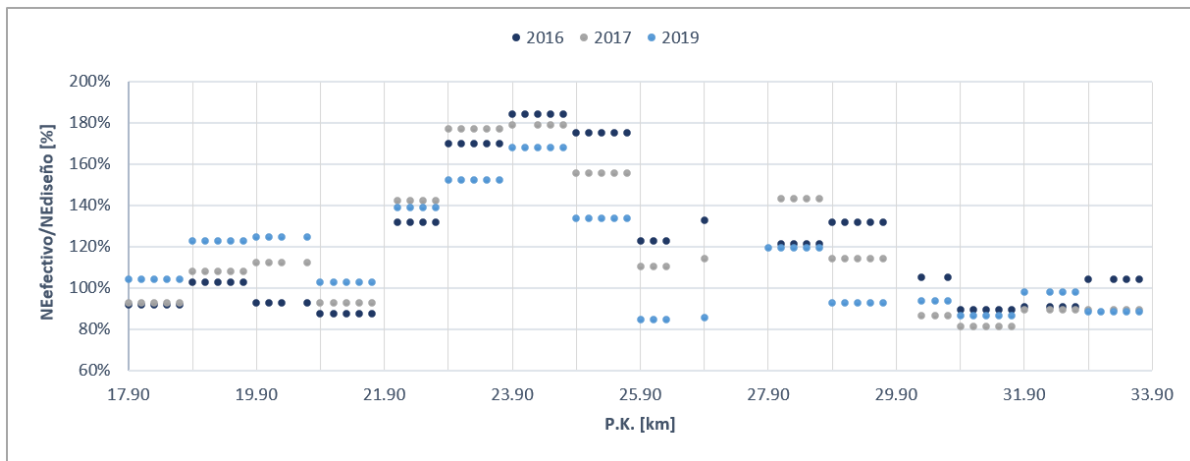
**Tabla 2.3.10:** Comparación de métodos de tramificación.

Método de tramificación	Ventajas	Desventajas
Sectores de longitud constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Análisis más detallado de una carretera.</li> <li>•Sencillo y fácil de aplicar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Los sectores finales de cada tramo de diseño pueden ser de menor longitud debido a la división constante. Menor longitud implica tener menos puntos de medición.</li> <li>•Requiere de criterios para definir la longitud.</li> </ul>
Sectores de longitud constante en función de tramos de diseño	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Análisis más detallado de una carretera.</li> <li>•Sectores de un tramo de diseño tienen la misma cantidad de mediciones.</li> <li>•Sencillo y fácil de aplicar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Requiere de criterios para definir la longitud de cada sector.</li> </ul>
Sectores por método de diferencias acumuladas	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Define sectores que efectivamente tienen igual capacidad estructural.</li> <li>•No depende directamente de la longitud de los tramos de diseño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Requiere de criterios para definir los sectores homogéneos e información de la capacidad estructural inicial de una carretera.</li> <li>•Trabajo analítico mayor a los demás métodos.</li> </ul>

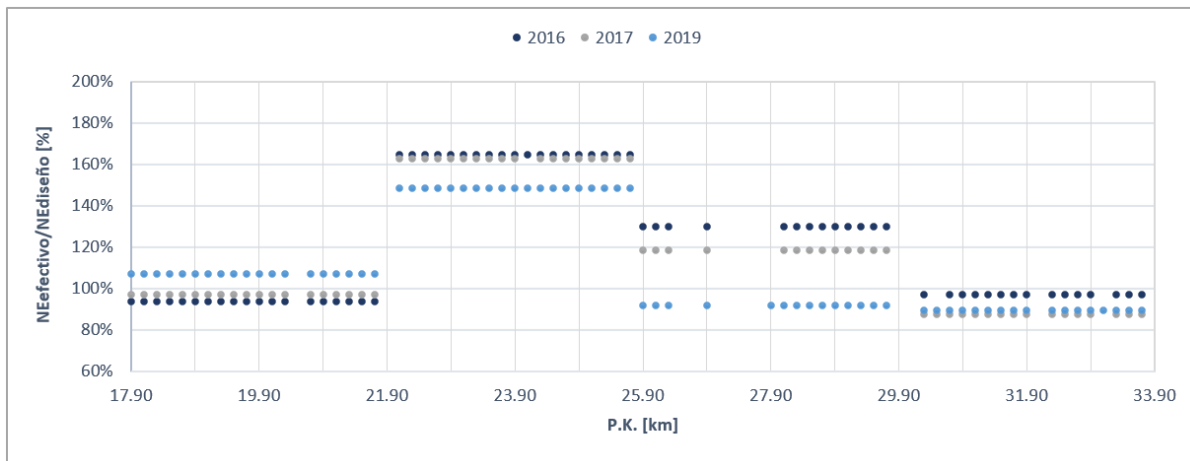
De la tabla anterior es posible ver que cada método tiene ventajas y desventajas que pueden decidir su elección frente a los demás, sin embargo, no es posible definir cuál es la mejor opción para hacer una valoración del activo. Un aspecto importante que tiene que tener la tramificación, es que representen el comportamiento de la capacidad estructural a través del tiempo. Esto significa que frente a la demanda de los pavimentos (tráfico y clima), la capacidad estructural disminuya con el paso del tiempo a menos que una actividad de rehabilitación importante se ejecute en él.

A continuación, en la Figura 2.3.8 se presenta el comportamiento del ratio para tres años de evaluación (2016, 2017 y 2019). En la figura (a) los datos se agruparon por 1 km; en la figura (b), se agruparon cada 4 km y en la figura (c), se agruparon por método de diferencias acumuladas. Es importante mencionar que dentro de la información analizada no se encuentran las actividades de rehabilitación que se ejecutaron en la vía estudiada, por lo que esta variable se desconoce. El detalle de los valores de cada gráfico se presenta en el Apéndice B.4.

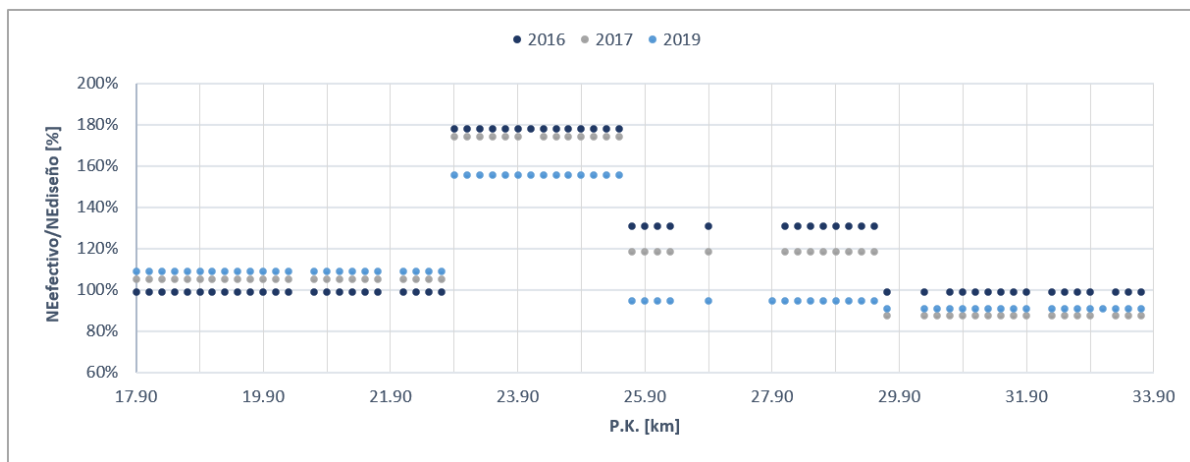
Como puede observarse, de manera general en los tres métodos de tramificación, existen variaciones en el ratio con el paso de los años. La disminución representa un cambio normal en la capacidad estructural debido al uso del pavimento, como se aprecia claramente entre el kilómetro 25.900 y 29.900 de la tramificación por 4 km (figura b). En este caso, el ratio disminuye de 129.8 % (año 2016) a 118.5 % (año 2017) y luego a 91.7 % (año 2019).



a) Tramificación 1km



b) Tramificación 4km



c) Tramificación método diferencias acumuladas

**Figura 2.3.8:** Evolución temporal del ratio  $NEfectivo/NEdiseño$  para diferentes métodos de tramificación.

Fuente: Elaboración propia.

Existen otros casos donde el ratio aumenta de un año a otro, por ejemplo, entre los kilómetros 17.900 y 21.900 en la tramificación por 1 km (figura a). Estos aumentos pueden ser de 1.0 % o 19.6 % en algunos casos, tal como se muestra en la Tabla 2.3.11. La variación positiva del ratio puede deberse a una o más de estas causas:

1. Fue ejecutada alguna actividad de rehabilitación que aumentó la capacidad estructural en el sector.
2. La variación no representa realmente un aumento de la capacidad estructural, más bien se trata de un aspecto numérico que no refleja cambios en el comportamiento del pavimento.
3. La metodología de tramificación afecta el valor del indicador.

**Tabla 2.3.11:** *Ejemplo del comportamiento del ratio para tramificación por 1 km.*

Sector homogéneo	P.K. [km]	NEfectivo/NEdiseño [ % ]				
		2016	2017	2019	△ 2016-2017	△ 2017-2019
1	17.900-18.900	91.7	92.7	104.1	1.0	11.4
2	18.900-19.900	103.0	108.2	122.6	5.2	14.4
3	19.900-20.900	92.7	112.3	124.7	19.6	12.4
4	20.900-21.900	87.6	92.7	103.0	5.1	10.3

Dado que no se tiene información sobre las actividades de conservación de la vía para los años analizados, no se puede establecer si el aumento de la capacidad se deba a alguna rehabilitación en cada sector o no. Esta variable es muy importante para poder definir correctamente la tramificación y validar variaciones como las presentadas en las gráficas de la Figura 2.3.8.

Por otra parte, no se cuenta con la experiencia práctica para determinar si los aumentos del ratio se deben a aspectos numéricos o realmente corresponde a un aumento de la capacidad estructural del sector. En este ámbito se podría definir que variaciones menores a un cierto porcentaje, por ejemplo 5 %, no representan un cambio sustancial en el comportamiento del pavimento, sin embargo, no se tiene el respaldo para determinar este umbral.

En consecuencia de lo anterior, tampoco es posible determinar si los métodos de tramificación están influyendo en el valor del ratio. Debido a esto es necesario contar con datos de deflectometría de otras rutas para realizar el mismo análisis y validar las metodologías presentadas en este estudio. Sin embargo, estas metodologías representan un punto de partida para utilizar el número estructural efectivo como un indicador para la valorización del patrimonio vial de pavimentos asfálticos.

### **Incertidumbres asociadas a la valoración mediante NE efectivo**

Luego de hecha la propuesta de valoración, es necesario realizar algunos comentarios generales con respecto a su uso. En primer lugar, los ensayos de deflectometría de impacto tienen varias aplicaciones en el diseño y rehabilitación de pavimentos, ya sean de asfalto u hormigón, y tienen la ventaja frente a otros métodos de auscultación en que corresponde a un ensayo no destructivo. Sin embargo, tanto las deflexiones como el número estructural efectivo son sensibles a otras variables que deben ser correctamente documentadas para representar el comportamiento estructural del pavimento. Tanto las condiciones ambientales, la temperatura del pavimento y el espesor de las capas deben ser registradas para aplicar factores de corrección (en el caso de las deflexiones) o realizar el retrocálculo. Por tanto, las mediciones finales del ensayo presentan una incertidumbre en menor o mayor grado en función de la correcta ejecución de este. En este sentido, es necesario que el número estructural efectivo sea medido o calibrado a la misma temperatura que fue definido el número estructural de diseño.

Por otra parte, es deseable efectuar las pruebas fuera del área de influencia de estructuras de drenaje y de zonas deterioradas; de ser el caso, es necesario reportar la ubicación, el tipo de daño y severidad, y el tipo de obra (alcantarilla, puente, etc.), para ayudar a explicar los valores posteriores. Se ha encontrado que estas características pueden llegar a tener mayor incidencia en la respuesta de deflexiones del pavimento, que la misma rigidez de las capas (Beltrán, 2012).

Otro aspecto importante es la experiencia al momento de trabajar con la información y resultados del ensayo de deflectometría de impacto. El Manual de Carreteras, recalca que el proceso de retroanálisis es complejo y requiere experiencia, ya que puede haber diversos ajustes, siendo necesario un conocimiento acabado de los modelos de comportamiento de estructuras de pavimentos (MOP, 2020-i).

Todos estos aspectos contribuyen a la incertidumbre asociada al uso del número estructural efectivo en la valoración patrimonial de pavimentos asfálticos. No obstante, es de los ensayos más utilizados a nivel nacional e internacional en la caracterización de la resistencia estructural de los pavimentos y si se toman todas las precauciones antes mencionadas, los datos obtenidos entregarán una representación adecuada del estado del pavimento.

Una vez procesada la información y dado que el deflectómetro de impacto es un equipo de medición puntual, es fundamental realizar una tramificación o segmentación estructural a partir de los datos y de las características del proyecto analizado. Tanto los tramos de diseño como los espesores de pavimento son necesarios como punto de partida para elegir el algoritmo apropiado de tramificación. En la literatura hay varias formas de hacerlo, pero en este estudio fueron analizadas y comparadas tres metodologías, concluyendo que realmente no existe una opción mejor frente a las demás, sino que depende de los criterios adoptados y de la cantidad de información disponible.

Otro punto que puede generar incertidumbres y debate es la elección del valor característico de cada segmentación estructural. Para la valoración del activo se propone eliminar los valores máximos (outliers) del análisis porque distorsionan la homogeneidad de la capacidad estructural que se busca en un proyecto a través de un buen diseño, construcción y/o rehabilitación. Además, pueden representar secciones singulares de una carretera como los mencionados anteriormente. Los valores mínimos se procuran conservar

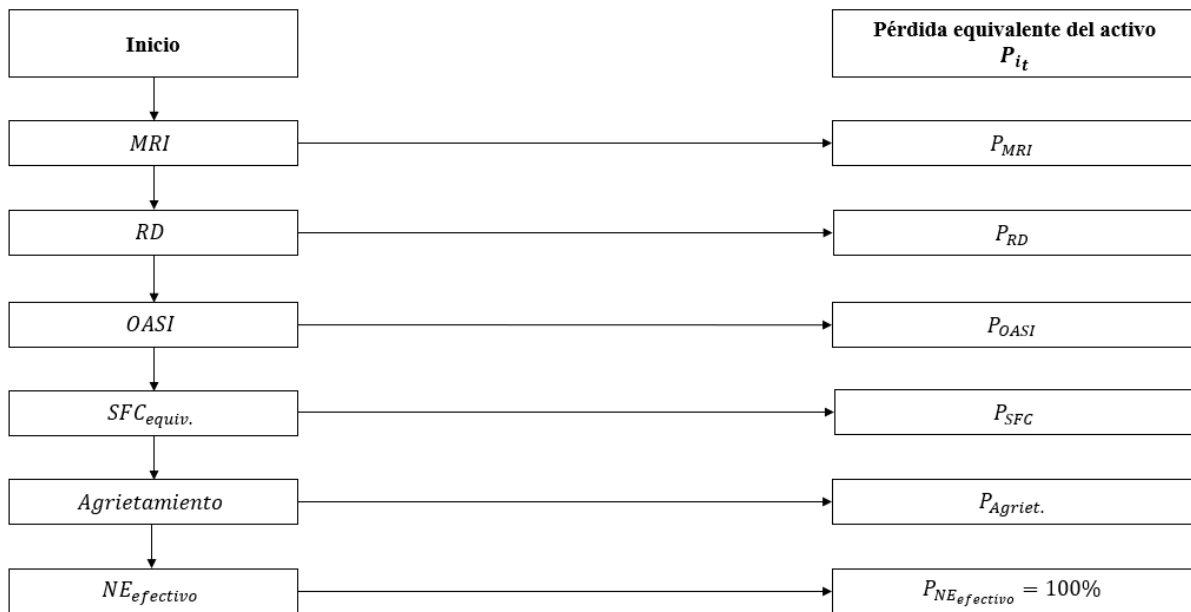
en el cálculo, ya que se quiere incluir las zonas de debilidad que representan una pérdida de la capacidad estructural en el tiempo frente al uso del pavimento o el mal diseño o construcción. Para determinar el valor representativo existen diversos métodos estadísticos para apoyar la toma de decisión, los cuales fueron mencionados en el desarrollo de indicador y que concluyeron que el número estructural efectivo promedio es adecuado para los objetivos buscados.

Para este estudio solo fue posible contar con información de deflectometría de una ruta y no se tenían las actividades de rehabilitación ejecutadas en el pavimento, por lo que la metodología de valoración no se encuentra validada. Sin embargo, los pasos propuestos para su definición se pueden utilizar cuando se disponga de más datos de otras rutas.

Los tópicos revisados corresponden a la evaluación propia de la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos, pero también es necesario analizar cómo los métodos de tramificación influyen en el valor económico de un proyecto. En el Capítulo 3 se aplicará el método de valoración para las distintas segmentaciones revisadas, con el objetivo de comparar sus efectos en el valor del activo.

### 2.3.8. Esquema y fórmulas por costo de desempeño

A partir de las actividades de rehabilitación definidas en las secciones anteriores, se presenta el esquema de la Figura 2.3.9, el cual asocia cada indicador técnico con su respectiva pérdida equivalente de valor en función del nivel de desempeño que se tenga. Los porcentajes  $P_{it}$  son los definidos en las Tablas 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, respectivamente. Para el  $NE_{efectivo}$  no se definen niveles de desempeño, por lo que el porcentaje de pérdida siempre es el costo de la actividad de rehabilitación.



**Figura 2.3.9:** Esquema para el costo de rehabilitación de pavimentos asfálticos.

Fuente: Elaboración propia.

El costo de rehabilitación para cada indicador técnico se obtiene de la Ecuación 2.3.6:

$$CRh_{it} = P_{it} \cdot C_i \tag{2.3.6}$$

Donde:

$CRh_{it}$  : Costo de rehabilitación asociado al i-ésimo indicador en el tiempo “t”, en [UF].

$P_{it}$  : Porcentaje de pérdida del activo asociada al i-ésimo indicador técnico en tiempo “t”. Para NE efectivo,  $P_{NE_{efectivo}} = 100\%$ .

$C_i$  : Costo de la actividad de rehabilitación asociada al i-ésimo indicador técnico cuando se alcanza el nivel de desempeño “Malo” (excepto para  $NE_{efectivo}$ ), según Tabla 2.3.12, en [UF].

$i$  : Contador de indicador técnico, donde  $i = \{MRI, RD, OASI, SFC_{equiv.}, Agriet., NE_{efectivo}\}$ .

**Tabla 2.3.12:** Resumen de actividades de rehabilitación por indicador técnico.

Indicador técnico	Característica evaluada	Actividad de rehabilitación
MRI	Regularidad longitudinal	Repavimentación de 60 mm de espesor
RD	Regularidad transversal	Repavimentación de 60 mm de espesor
OASI	Nivel de ruido de rodadura	Microaglomerado discontinuo en caliente de 35 mm de espesor
SFC equiv.	Resistencia al deslizamiento	Microaglomerado discontinuo en caliente de 10 mm de espesor
% Agrietamiento	Agrietamiento	Repavimentación a espesor total de capas asfálticas
NE efectivo	Capacidad estructural	Repavimentación de espesor $h_{rec}$

Por último, dado que los indicadores se reportan en secciones de 50 m, la valoración se realizará en esta misma unidad. Para definir el costo de rehabilitación total por desempeño de una sección de 50 m, se define la Ecuación 2.3.7:

$$CRehab_{u_t} = máx \{ CRh_{MRI_t}, CRh_{RD_t}, CRh_{OASI_t}, CRh_{SFC_t}, CRh_{Agr_t}, CRh_{NE\text{efectivo}_t} \} \quad (2.3.7)$$

Donde:

$CRehab_{u_t}$  : Costo de rehabilitación por desempeño para una sección u-ésima de 50 m de la carretera en el tiempo “t”, en [UF].

Se considera el mayor costo debido a que este valor incluye a los demás indicadores y es equivalente a lo que efectivamente ha perdido valor. Es importante recalcar que tanto la actividad como el costo de rehabilitación obtenido de la fórmula no determina la acción de conservación que debe ejecutar el concesionario, sino que se establece para determinar el valor del pavimento en un tiempo determinado. No obstante, la actividad ejecutada debe contemplar la mejora de todos los indicadores que estén teniendo un porcentaje de pérdida, ya que de no hacerlo, el activo seguirá teniendo menor valor. A modo de ejemplo, se tiene el desempeño de dos secciones de pavimento (200 m de longitud, 3.5 m de ancho):

**Tabla 2.3.13:** Ejemplo del desempeño y costo de rehabilitación de dos secciones de pavimento.

Sección	Indicador técnico	Nivel de desempeño	$CRh_{i_t}^*$ [UF]	Sección	Indicador técnico	Nivel de desempeño	$CRh_{i_t}^*$ [UF]
1	MRI	Malo	298.12	2	MRI	Bueno	74.53
	RD	Justo	149.06		RD	Muy Bueno	0.0
	OASI	Muy Bueno	0.0		OASI	Muy Bueno	0.0
	SFC equiv.	Muy Bueno	0.0		SFC equiv.	Muy Malo	195.86
	Agriet.	Malo	717.31		Agriet.	Muy Bueno	0.0
	NE efectivo	-	210.95		NE efectivo	-	0.0

\*Obtenidos a partir P.U. (MOP, 2021)

Si se aplica la Ecuación 2.3.7 en la sección 1, el mayor costo es de UF 717.31 y está asociado al desempeño del indicador de Agrietamiento. Sin embargo, también existe pérdida por otros indicadores, pero se encuentran incluidas en este valor. En este caso, si el concesionario decide ejecutar la repavimentación de las capas asfálticas de manera correcta y con los materiales adecuados, los demás indicadores volverían al nivel de desempeño Muy Bueno, pero si decide ejecutar solo un sello de grietas, por ejemplo, aún existiría pérdida asociada a los demás indicadores, ya que esta actividad no lleva al pavimento en forma general a su condición “como nuevo”.

De forma análoga, en la sección 2 el mayor costo es de UF 195.86 y está asociado al desempeño del indicador de resistencia al deslizamiento. En este caso este valor está determinado como una penalización mayor al costo de rehabilitar esta característica, ya que un microaglomerado de 10 mm de espesor tiene un valor de UF 97.93, sin embargo, se establece esta pérdida porque el nivel de servicio en esta sección es inaceptable para el estándar de carreteras concesionadas. En esta situación, el concesionario podría ejecutar la actividad que lleve al SFC equiv. a un umbral Muy Bueno, pero podría no mejorar la condición del indicador MRI. O bien, podría contemplar una acción de conservación de menor costo que UF 195.86 y mejorar el desempeño de ambos indicadores técnicos.

Por estas razones es que tanto las actividades de rehabilitación (Tabla 2.3.12) como los porcentajes asociados a cada nivel de desempeño (Tabla 2.2.9) se establecen como una pérdida equivalente para determinar el valor del activo.

## 2.4. Costos adicionales para valoración

Adicionalmente al costo histórico por la estructura de pavimento y los costos derivados por el desempeño de los indicadores técnicos, se propone considerar otros costos dentro del método de valoración. La demarcación horizontal se relaciona directamente con el pavimento ya sea en la construcción, mantención o conservación del activo, puesto que al realizar alguna de estas acciones se debe efectuar la correspondiente señalización de tránsito horizontal. La demarcación consiste en líneas, símbolos, letras y otras, que incluyen las tachas retrorreflectantes, que informan, previenen y regulan el tránsito vehicular del camino y están directamente relacionadas con la seguridad de los usuarios.

De la misma manera, ante la construcción o cualquier actividad de rehabilitación del pavimento se deben considerar todos aquellos gastos que le agregan valor al activo o que permiten realizar las acciones y no son consideradas dentro de las partidas ya definidas. Estos se denominan gastos indirectos y ocurren en función de la obra realizada. Para el caso de las rehabilitaciones del pavimento se pueden incluir todos los elementos que permitan canalizar el tránsito usuario, desplazado de sus lugares habituales de circulación. Dentro de los elementos necesarios se encuentra la señalización vertical y horizontal, elementos de canalización y segregación, y dispositivos de señalización variable diurna y nocturna, si fuese el caso.

A continuación, serán detalladas las consideraciones para el cálculo tanto del costo asociado a la demarcación del pavimento, como a los gastos indirectos específicos.

### 2.4.1. Costos por demarcación del pavimento

Existen varias clasificaciones de las demarcaciones, ya sea por función, forma, características, materiales y otros aspectos. La señalización según altura se clasifica en plana (hasta 6 mm) y elevada (entre 6 y 21 mm). La clasificación según forma distingue a las líneas, símbolos, leyendas y otras demarcaciones (MOP, 2020-e).

De acuerdo con el diseño y especificaciones del proyecto pueden existir distintas configuraciones de demarcación a lo largo de una carretera concesionada, ya sea en tramos rectos, curvos, zonas de cobros, enlaces, pistas de incorporación y de egreso, pistas auxiliares, entre otras. En base a esto, se propone una unidad base de demarcación que considere una configuración representativa de la carretera y que sea compatible con la unidad de auscultación y reporte de los indicadores técnicos del pavimento, de una longitud igual a 50 m.

La configuración más representativa de una carretera interurbana concesionada corresponde a la visualizada en la Figura 2.4.1, donde se aprecian tramos de las concesiones: Concesión Ruta 5 Tramo Collipulli-Temuco (arriba-izquierda), Concesión Ruta 5 Tramo Río Bueno - Puerto Montt, (arriba-derecha), Concesión Interconexión Vial Santiago-Valparaíso-Viña del Mar, Ruta 68 (abajo-izquierda) y Concesión Ruta 57 Santiago - Colina - Los Andes (abajo-derecha).



**Figura 2.4.1:** Ejemplos de carreteras interurbanas chilenas con pavimentos asfálticos.

Fuente: Google Street View.

La demarcación representativa corresponde a una línea lateral continua, líneas segmentadas de separación de pistas y tachas reflectantes (blancas y/o rojas). De acuerdo con las disposiciones del Manual de Carreteras, las líneas de separación de pistas tienen la siguiente configuración:

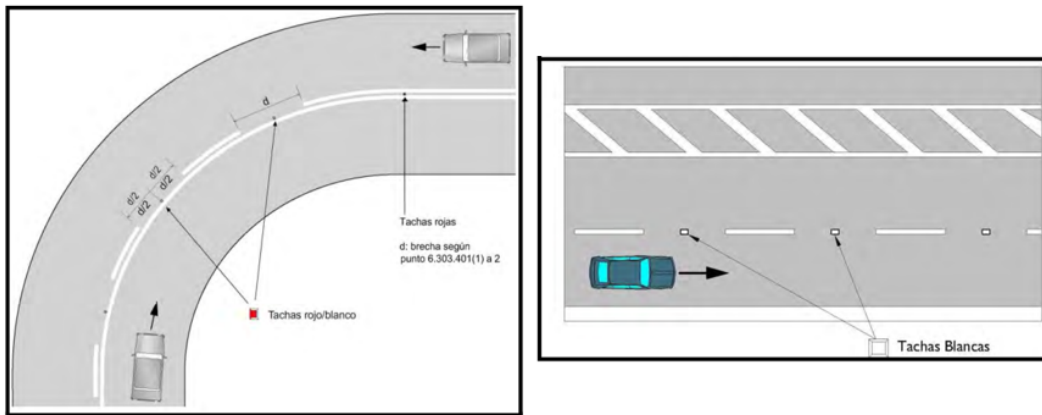
**Tabla 2.4.1:** Relación demarcación/brecha en líneas de pistas, Tabla 6.303.401.A (MOP, 2020-e).

Velocidad Máxima de la Vía (km/h)	Patrón (m)	Relación Demarcación Brecha
$V \geq 60$ km/h Ancho = 15 cm	8 ó 12	1 a 3 ó 3 a 5
$V < 60$ km/h Ancho = 12 cm	8	3 a 5

La demarcación elevada (tachas) en líneas segmentadas de pistas deben disponerse en la mitad de la brecha de demarcación, tal como lo indica la Figura 2.4.2. También se indica que cuando se dispongan tachas tanto en el eje como el en el borde, estas deberán desfazarse en la mitad de su espaciamiento, es decir, no deben estar ubicadas en una misma sección transversal.

Por tanto, si se considera una relación demarcación brecha mínima de 1 a 3, en una sección de 50 m se tienen un total de 12 tachas blancas (separación de pistas) y 12 tachas rojas en el borde continuo de la pista.

Las consideraciones anteriores se basan en las disposiciones actuales del Manual de Carreteras (MOP, 2020-e) y en caso de modificarse, se debe actualizar el cálculo de la unidad base de demarcación.



**Figura 2.4.2:** Disposición de tachas en líneas segmentadas de eje y pistas.

Fuente: Figura 6.303.404.F (MOP, 2020-e).

Finalmente, las partidas, bases de medición y cantidades para el costo por demarcación en una sección de 50 m se detalla en la Tabla 2.4.2. Como la unidad de demarcación representativa es constante, su valor es fijo y depende de los precios unitarios definidos en la base de licitación.

**Tabla 2.4.2:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para cálculo del costo de rehabilitación por demarcación plana y elevada.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.700	ELEMENTOS DE CONTROL Y SEGURIDAD		
704-3	Demarcación, Líneas Segmentadas de Separación de Pistas	Km	0.05
704-7	Demarcación, Línea Lateral Continua	Km	0.05
705-1	Tachas Reflectantes	N°	24

A continuación, son detalladas las consideraciones que se deben tener para el costo histórico y para el costo de rehabilitación.

**Consideraciones para el costo histórico**

Puesto que se ha definido una demarcación representativa, para el costo histórico del pavimento se debe considerar que la totalidad de la carretera tiene esta configuración. Por tanto, el costo de demarcación del pavimento que se define en la Ecuación 2.4.1 se obtiene de la siguiente manera:

$$CDem = \sum_{u=1}^v CDem_u \tag{2.4.1}$$

Donde:

*CDem* : Costo por la demarcación horizontal del pavimento, en [UF].

$CDem_u$  : Costo de la unidad representativa de demarcación del pavimento, correspondiente a una sección u-ésima de 50 m de la carretera, en [UF].

$v$  : Cantidad total de secciones de 50 m de la carretera en el tiempo “t”.

**Consideraciones para el costo de rehabilitación**

Para el costo de rehabilitación es necesario tener en cuenta el nivel de desempeño de los indicadores técnicos, ya que en algunos casos la pérdida de valor no es equivalente al costo total de la actividad de rehabilitación.

En la Sección 2.3.8 el costo de rehabilitación por indicador técnico se obtiene con el porcentaje en función del nivel de desempeño (0%, 25%, 50%, 100% o 200%) y el costo de la actividad. Luego, el costo de rehabilitación final de una sección de 50 m se define como el mayor costo entre los asociados a cada indicador técnico (Ecuación 2.3.7). Por tanto, el costo de demarcación debe considerar el origen de la pérdida de valor en el activo. Se tienen los siguientes casos:

Si  $CRhab_{u_t} = CRh_{NEefectivo_t}$  entonces,  $CDem_{reh_{u_t}} = CDem_u$

Si  $CRhab_{u_t} = \begin{cases} CRh_{MRI_t} \\ CRh_{RD_t} \\ CRh_{OASI_t} \\ CRh_{SFC_t} \\ CRh_{Agr_t} \end{cases}$  entonces,  $CDem_{reh_{u_t}} = P_{dem_t} \cdot CDem_u$

Donde

$CRhab_{u_t}$  : Costo de rehabilitación por desempeño para una sección u-ésima de 50 m de la carretera en el tiempo “t”, en [UF].

$CDem_{reh_{u_t}}$  : Costo por demarcación del pavimento para una sección u-ésima de 50 m de la carretera en el tiempo “t”, en [UF].

$CDem_u$  : Costo de la unidad representativa de demarcación del pavimento, correspondiente a una sección u-ésima de 50 m de la carretera, en [UF].

$P_{dem_t}$  : Porcentaje de pérdida asociado al indicador que genera el mayor costo de rehabilitación para la sección u-ésima de 50 m de la carretera en el tiempo “t”.

A modo de ejemplo, se tienen las dos secciones de 50 m de longitud de la Tabla 2.4.3, donde se presentan los costos de las actividades de rehabilitación, el nivel de desempeño de cada indicador técnico y el costo por demarcación asociado a cada sección. El costo de la unidad de demarcación representativa ( $CDem_u$ ) es de 5.79 [UF] utilizando los precios unitarios del último contrato de concesión vial (MOP, 2021).

**Tabla 2.4.3:** Ejemplos para costo de demarcación asociado al desempeño del pavimento.

Sección	Indicador técnico	Nivel de desempeño	Costo act. rehab.* [UF]	$P_{i_t}$ [%]	$CRh_{i_t}$ [UF]	$CDem_{reh_{i_t}}$ [UF]
1	MRI	Justo	74.53	50 %	37.27	5.79
	RD	Bueno	74.53	25 %	18.63	
	OASI	Muy Bueno	59.09	0 %	0.0	
	SFC equiv.	Muy Bueno	24.48	0 %	0.0	
	Agriet.	Muy Bueno	179.33	0 %	0	
	NE efectivo	-	60.17	100 %	60.17	

Sección	Indicador técnico	Nivel de desempeño	Costo act. rehab.* [UF]	$P_{i_t}$ [%]	$CRh_{i_t}$ [UF]	$CDem_{reh_{i_t}}$ [UF]
2	MRI	Bueno	74.53	25 %	18.63	1.45
	RD	Justo	74.53	50 %	37.27	
	OASI	Muy Bueno	59.09	0 %	0.0	
	SFC equiv.	Muy Bueno	24.48	0 %	0.0	
	Agriet.	Bueno	179.33	25 %	44.83	
	NE efectivo	-	37.88	100 %	37.88	

\*Obtenidos a partir P.U. (MOP, 2021)

En la sección 1, el mayor costo se debe al NE efectivo, por tanto, el costo de demarcación asociado es el valor total de la unidad representativa. Mientras que para la sección 2, el mayor costo se debe al Agriet., es decir, el costo de demarcación es el 25 % del valor de la unidad representativa.

A modo de comentario, la Dirección de Vialidad en su metodología de valoración de pavimentos (MOP, 2016-b) no considera la demarcación en el proceso de cálculo, más bien, es considerada como un gasto, ya que se realiza con una periodicidad aproximada de un año. En base a esto, la demarcación podría no incluirse, si es que se considera como gasto; en caso de ser valorizada, los procedimientos anteriores pueden utilizarse como referencia.

### 2.4.2. Costos indirectos

De acuerdo con Rodríguez (Rodríguez, 2020), los costos indirectos se tratan de gastos que ocurren en función de la obra (costos indirectos específicos) o se relacionan con la organización y actividad del contratista (costos indirectos generales). La suma de costos indirectos, incluidas las provisiones para contingencias, se denominaría gastos generales.

Serían costos indirectos de la ejecución de un proyecto de construcción, por ejemplo: los costos de personal de administración y supervisión; los costos del personal de oficina de terreno; el personal de ingeniería de terreno; el personal de compras, tráfico, bodegas; el personal de relaciones industriales; el personal de seguridad; personal de porteros, cuidadores, serenos. Se incluyen en esta partida los costos de movilización del personal; los costos de arriendos y servicios relacionados con la administración y supervisión de la obra; los costos de instalaciones temporales (oficinas, lugares de acopio, talleres, etc.)

Los costos indirectos incluyen también los costos de caminos de acceso, servicios de suministro, primas de seguros (daños a la propiedad; daños a terceros; todo riesgo de construcción; otros exigidos por el mandante). Estarían comprendidos en esta partida los costos financieros de boletas bancarias emitidas a nombre del que encarga la obra (seriedad de la propuesta, de ejecución de la obra). Es frecuente que se asigne a esta partida una contribución a los gastos de la oficina central. El impuesto al valor agregado (I.V.A.) que el contratista es obligado a pagar por las compras de materiales, insumos y servicios afectos, y el impuesto único de segunda categoría son costos indirectos de la obra. Las provisiones para contingencias pertenecen a los gastos generales de la obra, pero reciben distinto tratamiento según su forma de cálculo y destino final.

Con respecto a los trabajos de construcción y de rehabilitación en caminos entregados al uso público deben controlarse y regularse de acuerdo con las disposiciones generales del Manual de Carreteras, sección 5.004 “Disposiciones de Seguridad” (MOP, 2020-d) y a las dispuestas en el respectivo proyecto. El tránsito usuario y la señalización de faenas deberán regularse en conformidad con las disposiciones del capítulo 6.400 “Señalización de Tránsito para Trabajos en la Vía” (MOP, 2020-f).

De acuerdo con la sección 5.002.3 “Valor de las Obras y Formas de Pago” del Manual de Carreteras (MOP, 2020-d), cuando corresponda, durante el período de construcción, será necesario disponer de los elementos que permitan canalizar el tránsito usuario, desplazado de sus lugares habituales de circulación. Para ello, se deberá habilitar desvíos dentro del tramo en construcción o por rutas alternativas de circulación, así como rampas y caminos de acceso a estas. La construcción y conservación de todos los elementos de canalización provisoria serán de cargo del contratista, quien deberá incluirlos en los gastos generales del contrato.

Se incluirá en los gastos generales del contrato también, el valor de construir puentes provisorios o bade-nes, para habilitar los desvíos sobre ríos o esteros de sector cuando no se incluya expresamente este ítem como parte del presupuesto del proyecto. Asimismo, deberán incluirse en los gastos generales, seguridad e higiene, regularización del tránsito, manipulación de explosivos, canalización provisoria, puentes provisorios, etc., los imprevistos, y todo otro gasto que sea necesario para dar fiel cumplimiento al contrato.

En función de lo anterior, los costos indirectos deben incluirse dentro del cálculo del costo histórico del pavimento y del costo de rehabilitación; de esta forma, deben considerar todas las partidas o gastos que le agreguen valor al pavimento. La manera más común de incluir estos costos es a través de un porcentaje en función de la cantidad de obras ejecutadas. El porcentaje deberá ser definido en la correspondiente base de licitación en función de parámetros conocidos como la cantidad de kilómetros, costo total u otro. También puede ser definido por el Inspector Fiscal en el momento de realizar la valoración del patrimonio.

El porcentaje no necesariamente tiene que ser igual para el costo histórico y para el costo de rehabilitación, por lo que se distinguirán con la siguiente nomenclatura:

- $GI_{CH}$  , para el costo histórico del pavimento.
- $GI_{Rehab}$  , para el costo de rehabilitación.

A modo de comentario, de acuerdo con los antecedentes que se disponen, los precios unitarios dispuestos en el Anexo N°3 de las bases de licitación consideran gastos generales y utilidades. Debido a esto, no es necesario agregar un costo adicional al método de valoración, sin embargo, en caso de utilizar precios unitarios diferentes, estas partidas adicionales pueden ser incorporadas con los procedimientos descritos en esta sección.

### **Formulación final del método de valoración**

A partir de los costos definidos anteriormente, la formulación final del método de valoración de los pavimentos asfálticos se define según la Ecuación 2.4.2:

$$V_{PA_t} = \left( \sum_{s=1}^p CH_s + CDem + GI_{CH} \right) - \left( \sum_{u=1}^v (CRehab_{u_t} + CDemr_{u_t}) + GI_{Rehab_t} \right) \quad (2.4.2)$$

Donde:

$CH_s$  : Costo histórico del pavimento asfáltico del sector o subsector “s”, en [UF].

$p$  : Cantidad total de sectores o subsectores “s” del proyecto.

$CDem$  : Costo por la demarcación horizontal del pavimento, en [UF].

$GI_{CH}$  : Gastos indirectos asociados al costo histórico del pavimento, en [UF].

$CRehab_{u_t}$  : Costo de rehabilitación por desempeño para una sección u-ésima de 50 m de la carretera en el tiempo “t”, en [UF].

$CDemr_{u_t}$  : Costo por demarcación del pavimento para una sección u-ésima de 50 m de la carretera en el tiempo “t”, en [UF].

$GI_{Rehab_t}$  : Gastos indirectos asociados al costo de rehabilitación del pavimento en el tiempo “t”, en [UF].

$v$  : Cantidad total de secciones de 50 m de la carretera.

# Capítulo 3

## Caso de estudio

El presente capítulo tiene por objetivo aplicar a un caso real el modelo de valorización desarrollado en el capítulo 2. En base a esto, el capítulo se configura de la siguiente forma:

- En la Sección 3.1, se caracteriza la vía evaluada y la información disponible para aplicar el método.
- En la Sección 3.2, se presenta la evolución temporal del desempeño de los indicadores técnicos en los años de evaluación.
- En la Sección 3.3, se detallan las consideraciones para el cálculo del costo histórico y de rehabilitación.
- En la Sección 3.4, se presentan los resultados de valorización del activo para el caso de estudio.
- En la Sección 3.5, se comparan los resultados entre las distintas metodologías de tramificación para la información de deflectometría de impacto.
- En la Sección 3.6, se realiza un análisis del costo de rehabilitación de manera tal, de establecer la relación entre el nivel de servicio y el valor del activo.

## 3.1. Caracterización de la vía e información disponible

### 3.1.1. Características de la vía

Este proyecto comprende un total de 88.7 km de longitud distribuidos en doble calzada de dos pistas por sentido en toda su extensión. El flujo vehicular durante el mes de octubre de 2020 alcanzó un total de 651,311 vehículos. De este flujo, el 76% corresponde a vehículos livianos, y el 24% restante a vehículos pesados.

Cabe destacar que los umbrales de desempeño del contrato asociado a la ruta en análisis difieren de los que se aplicarán esta sección. Por lo cual, los incumplimientos que se registren en la presente sección no representan necesariamente incumplimientos en el contrato de la ruta misma. El objetivo que se busca es solamente una sensibilización de los resultados entregados por el método propuesto.

La ruta se divide en 5 tramos en función de los Ejes Equivalentes de diseño y de la estructura de pavimento construida. En la Tabla 3.1.1 se muestran los espesores promedio de cada capa de pavimento para los tramos de la vía.

**Tabla 3.1.1:** Estructura y espesores de pavimento por tramo de diseño.

Tramo	Longitud [km]	Estructura de pavimento			
		CR [cm]	CI [cm]	BG [cm]	NE diseño [cm]
T1	10.7	5.0	10.5	23.0	8.8
T2	2.9	5.0	14.0	24.0	10.4
T3	4.3	5.0	9.0	21.0	8.0
T4	16.0	7.0	10.5	23.0	9.7
T5	54.8	5.0	11.0	23.0	9.1

Como se observa de la tabla anterior, los tramos están contruidos con una carpeta de rodadura asfáltica (CR), luego una carpeta asfáltica intermedia (CI), finalizando con una capa de base granular (BG). El número estructural de diseño ( $NE_{diseño}$ ) se obtiene a partir de los espesores contruidos y los coeficientes estructurales y de drenaje para cada tramo.

### 3.1.2. Características de la información disponible

La información con la que se cuenta corresponde a la evaluación funcional y estructural de los pavimentos de la calzada principal (vía expresa) para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Respecto a la información disponible se distinguen datos para los siguientes indicadores:

- Regularidad longitudinal del pavimento (MRI)
- Regularidad transversal del pavimento (RD)
- Resistencia al deslizamiento (SFC equiv.)

- Porcentaje de agrietamiento
- Capacidad estructural ( $NE_{efectivo}$  y deflexiones)

Para la evaluación funcional del estado del pavimento se empleó un equipo de alto rendimiento denominado Laser Crack Measurement System (LCMS) que permite obtener la imagen del pavimento en tres dimensiones logrando identificar varios indicadores entre ellos, los deterioros superficiales, el ahuellamiento, el descenso de berma, los bacheos y escalonamiento. Para el levantamiento del perfil longitudinal (IRI) se monta e integra al equipo LCMS un perfilómetro láser (clase 1 por el Banco Mundial), por otra parte, la evaluación de la fricción se realizó utilizando el equipo Griptester. La evaluación de todos estos indicadores se reporta en secciones de 200 m de longitud.

Para la evaluación estructural se realizaron mediciones de deflexiones con el deflectómetro de impacto modelo Primax Falling Weight Deflectometer (FWD) cada 200 m-pista.

Para el indicador de nivel de ruido de rodadura (OASI) no existe información, ya que es un indicador nuevo para el cual no existe una base de datos histórica.

Como puede observarse, la información disponible debe ser adaptada al formato de evaluación de cada indicador de acuerdo con la ficha técnica respectiva (Apéndice A). La valorización se realizará en secciones de 200 m de longitud con los umbrales dispuestos para secciones de 50 m, considerando homogéneas las 4 secciones de 50 m equivalentes. La aproximación anterior resulta en límites menos restrictivos para los indicadores, pero no le quita validez a la sensibilización de los resultados presentada a continuación.

La evaluación se realiza a cada una de las pistas de la vía, siendo las pistas 1 y 2, pistas rápidas, y las pistas 3 y 4, pistas lentas. En la Tabla 3.1.2 se detalla la cantidad de secciones evaluadas para cada pista y la cantidad de kilómetros con respecto a la extensión total.

**Tabla 3.1.2:** *Cantidad de secciones de 200 m consideradas para la valorización.*

Año	Pista N°			
	1	2	3	4
2015	185 (41.7%)	185 (41.7%)	185 (41.7%)	185 (41.7%)
2016	389 (87.7%)	379 (85.5%)	388 (87.5%)	374 (84.3%)
2017	387 (87.3%)	376 (84.8%)	383 (86.4%)	349 (78.7%)
2018	393 (88.6%)	381 (85.9%)	396 (89.3%)	383 (86.4%)
2019	393 (88.6%)	380 (85.7%)	389 (87.7%)	358 (80.7%)

Nota: el valor porcentual representa la cantidad de kilómetros evaluados del total de la pista considerada.

De la Tabla 3.1.2 se observa que no se evalúa la totalidad de kilómetros de la vía, esto se debe a que se han considerado todas aquellas secciones que cuentan con la totalidad de los indicadores evaluados, con el fin de aplicar el método de valoración de la forma más completa posible, sin tener que realizar supuestos del nivel de desempeño de la información faltante.

De la misma manera, aquellas secciones que corresponden a singularidades de la vía como por ejemplo, pasos superiores, viaductos, bandas alertadoras, entre otras, no han sido consideradas dentro del análisis puesto que los indicadores funcionales no son evaluados en estos tramos. A pesar de lo anterior, en la mayoría de las pistas para cada uno de los años evaluados, se considera más del 80 % de kilómetros, excepto para el año 2015 donde se alcanza solo el 41.7 % de kilómetros.

Para las pistas 1 y 2 (pistas rápidas) solo se cuenta con la evaluación de los indicadores MRI, RD, SFC equiv. y porcentaje de Agrietamiento en los cinco años considerados. Por el contrario, las pistas 3 y 4 (pistas lentas) cuentan con información para todos los indicadores técnicos en los años de evaluación, excepto para el año 2018 donde no se tiene información de deflectometría de impacto. Esto permitirá comparar la pérdida de valor de pistas que cuentan solo con evaluación funcional y pistas que cuentan además, con evaluación estructural (FWD).

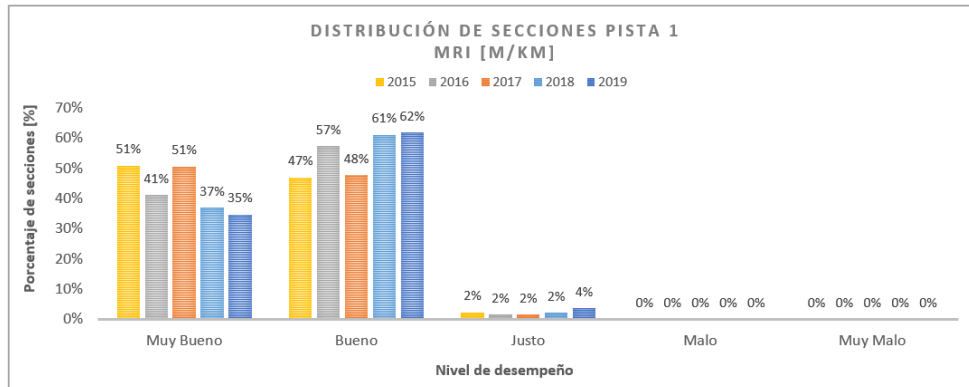
A continuación, se presenta la evolución temporal del nivel de desempeño de cada indicador en función de los umbrales admisibles presentados en la Sección 2.2.1. La información permite visualizar el estado del pavimento a partir de la cantidad de secciones en cada uno de los niveles de desempeño y explicar los resultados al aplicar el método de valoración.

### 3.2. Evolución temporal del desempeño de los indicadores

En las figuras se muestra el porcentaje de secciones de 200 m dentro de cada nivel de desempeño para el indicador de pavimento correspondiente. El detalle de los valores se encuentra en el Apéndice C.1.

#### 3.2.1. Pista 1

##### a) Regularidad longitudinal del pavimento

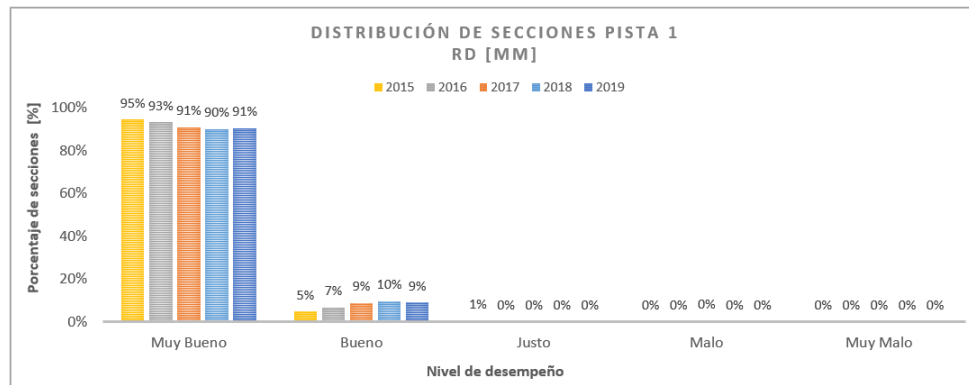


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.1:** Evolución temporal del indicador MRI - Pista 1.

Fuente: Elaboración propia.

##### b) Regularidad transversal del pavimento

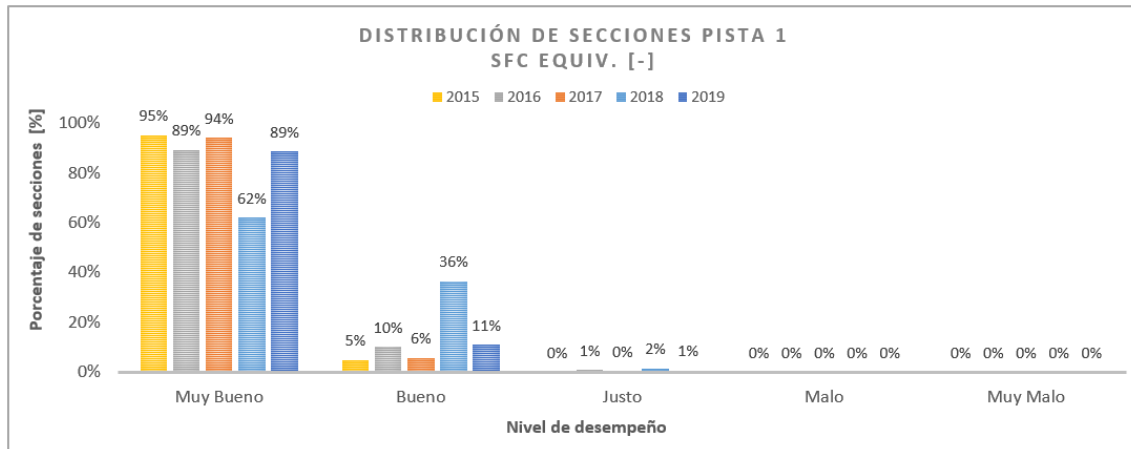


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.2:** Evolución temporal del indicador RD - Pista 1.

Fuente: Elaboración propia.

**c) Resistencia al deslizamiento**

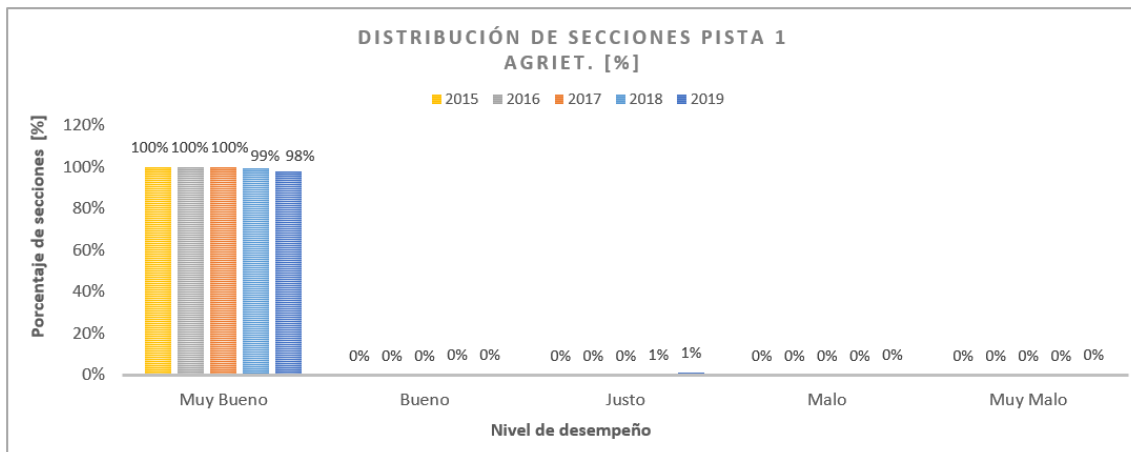


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.3:** Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 1.

Fuente: Elaboración propia.

**d) Porcentaje de agrietamiento**



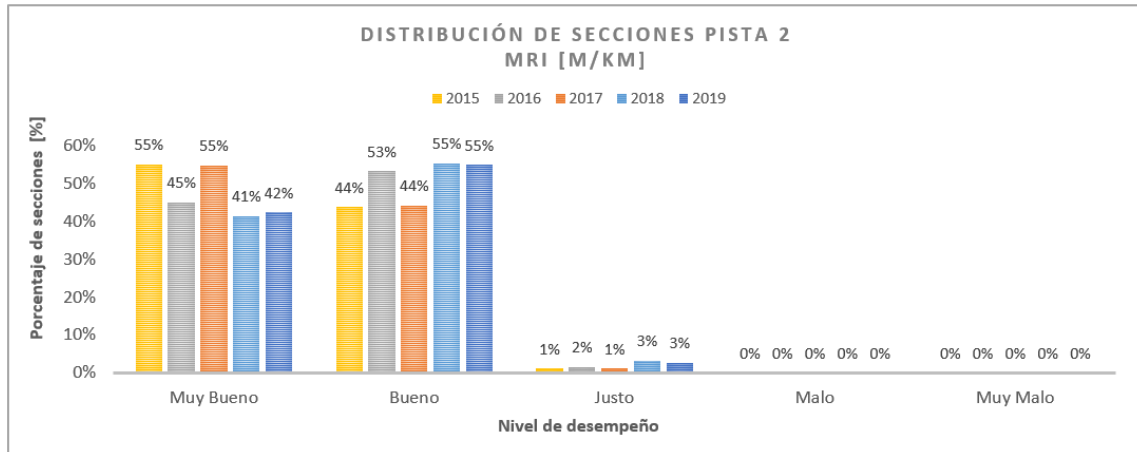
\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.4:** Evolución temporal del indicador porcentaje de Agrietamiento - Pista 1.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Pista 2

#### a) Regularidad longitudinal del pavimento

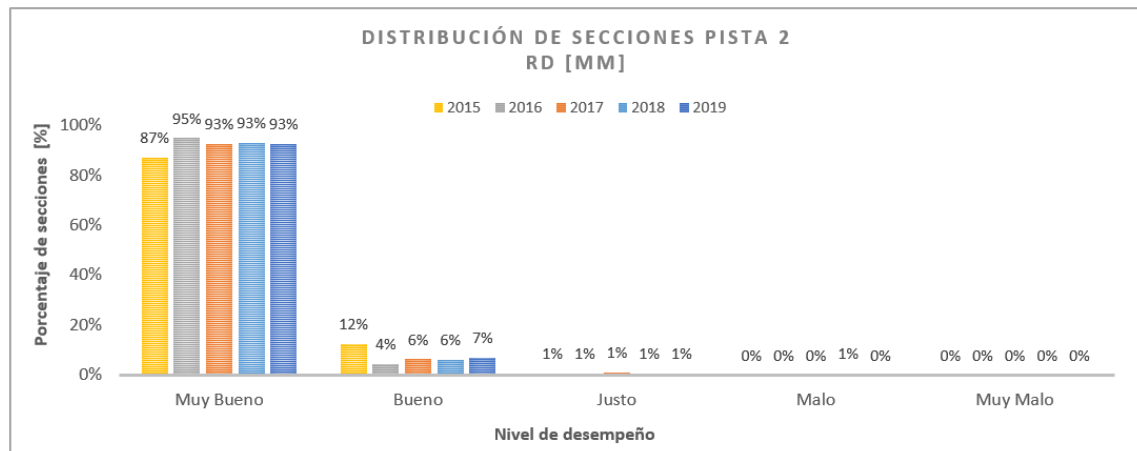


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.5:** Evolución temporal del indicador MRI - Pista 2.

Fuente: Elaboración propia.

#### b) Regularidad transversal del pavimento

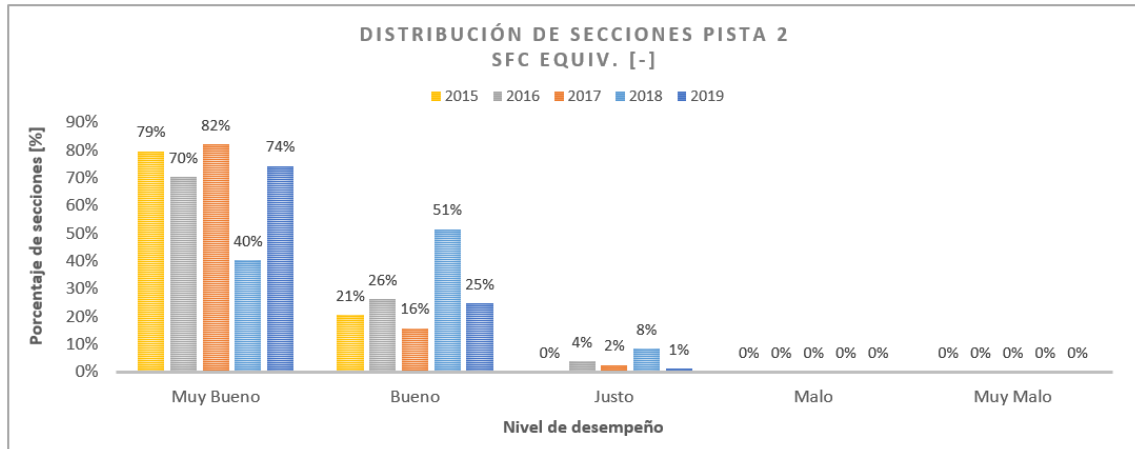


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.6:** Evolución temporal del indicador RD - Pista 2.

Fuente: Elaboración propia.

**c) Resistencia al deslizamiento**

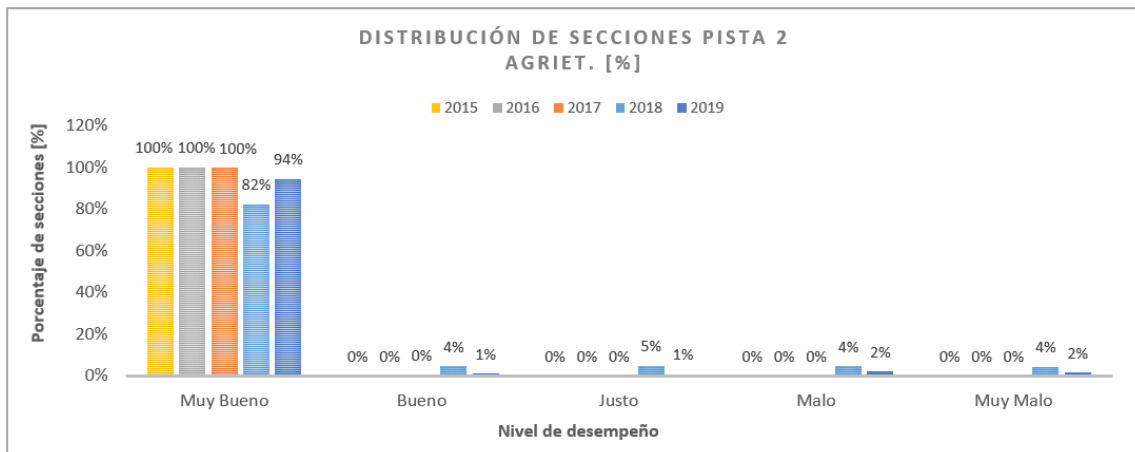


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.7:** Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 2.

Fuente: Elaboración propia.

**d) Porcentaje de agrietamiento**



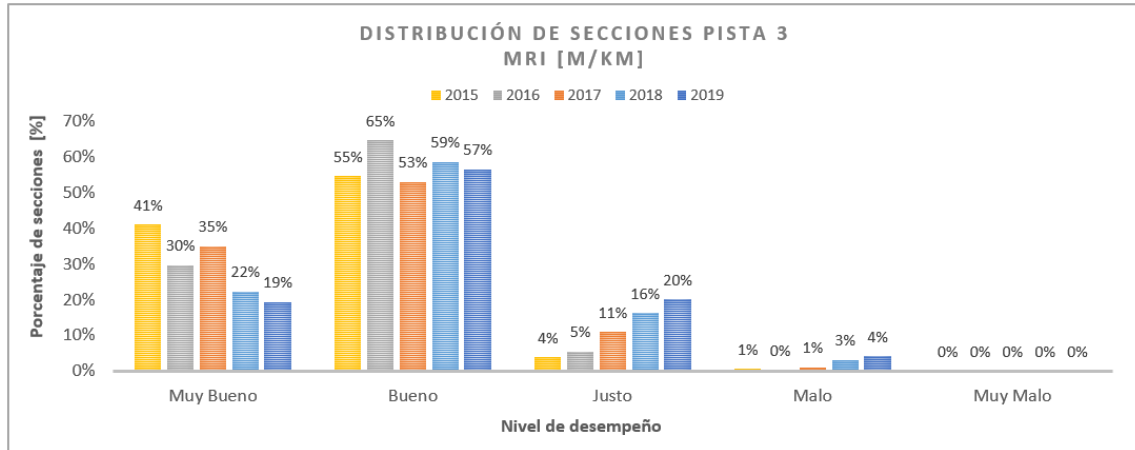
\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.8:** Evolución temporal del indicador porcentaje de Agrietamiento - Pista 2.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3. Pista 3

#### a) Regularidad longitudinal del pavimento

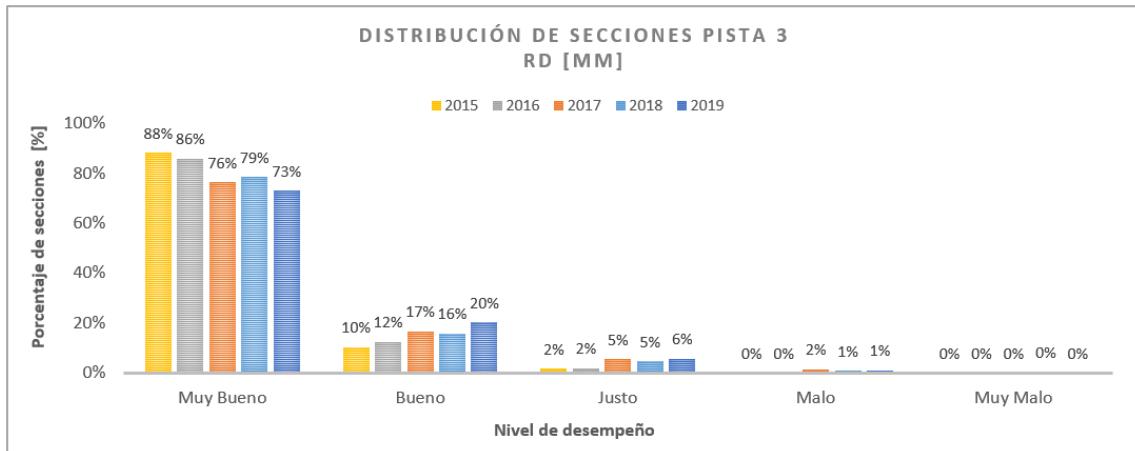


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.9:** Evolución temporal del indicador MRI - Pista 3.

Fuente: Elaboración propia.

#### b) Regularidad transversal del pavimento

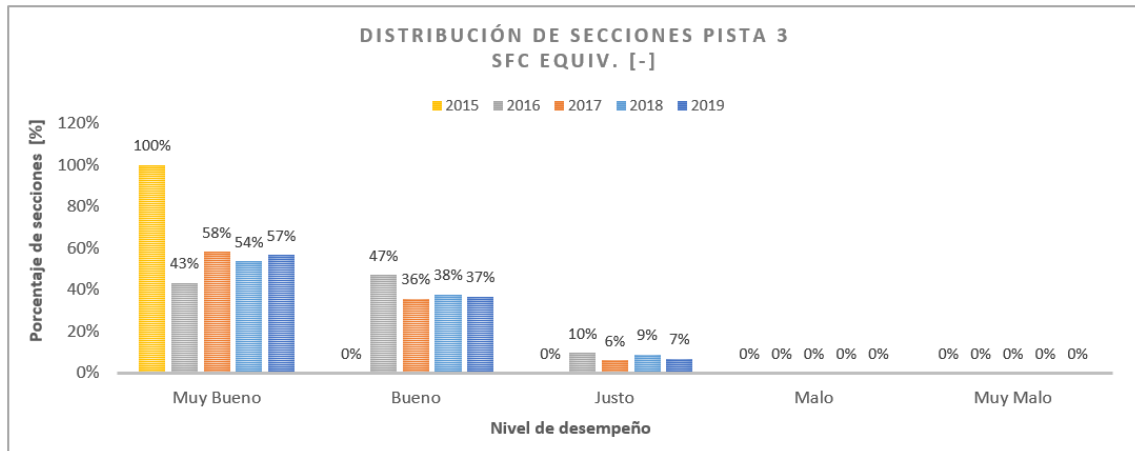


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.10:** Evolución temporal del indicador RD - Pista 3.

Fuente: Elaboración propia.

**c) Resistencia al deslizamiento**

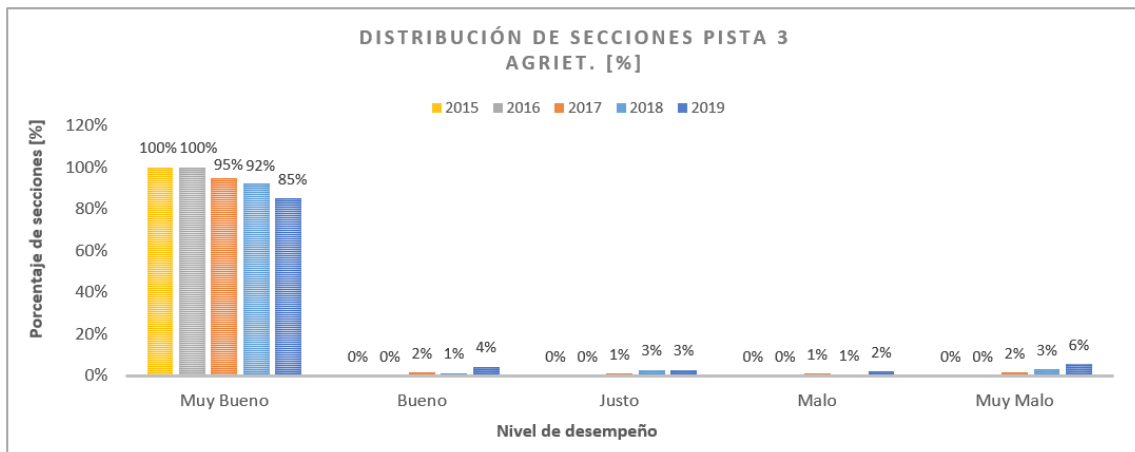


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.11:** Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 3.

Fuente: Elaboración propia.

**d) Porcentaje de agrietamiento**



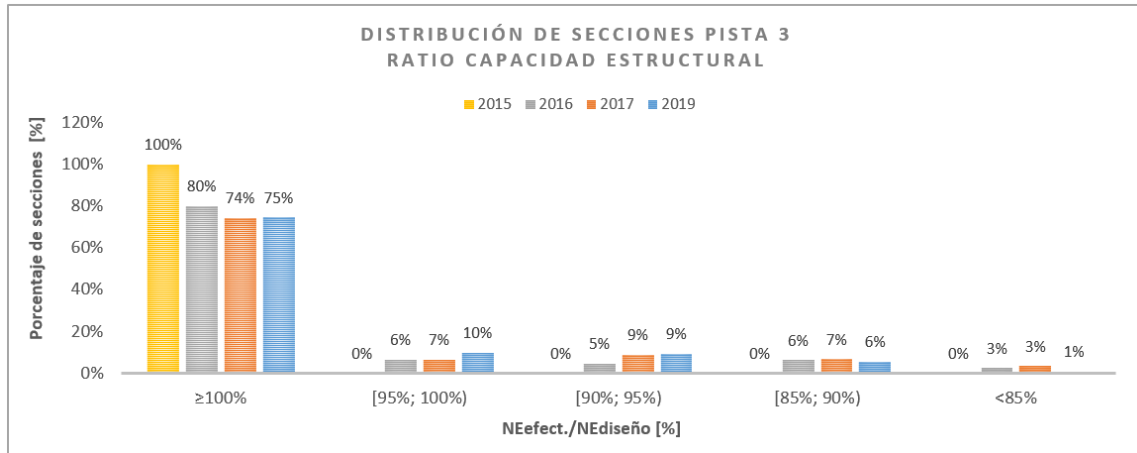
\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.12:** Evolución temporal del indicador porcentaje de Agrietamiento - Pista 3.

Fuente: Elaboración propia.

**e) Ratio NEfectivo/NEdiseño**

A modo de visualizar la capacidad estructural de la pista 3 se tiene la distribución de las secciones según una escala teórica. En la Figura 3.2.13 se muestra la cantidad de secciones según la tramificación estructural cada 1 km.



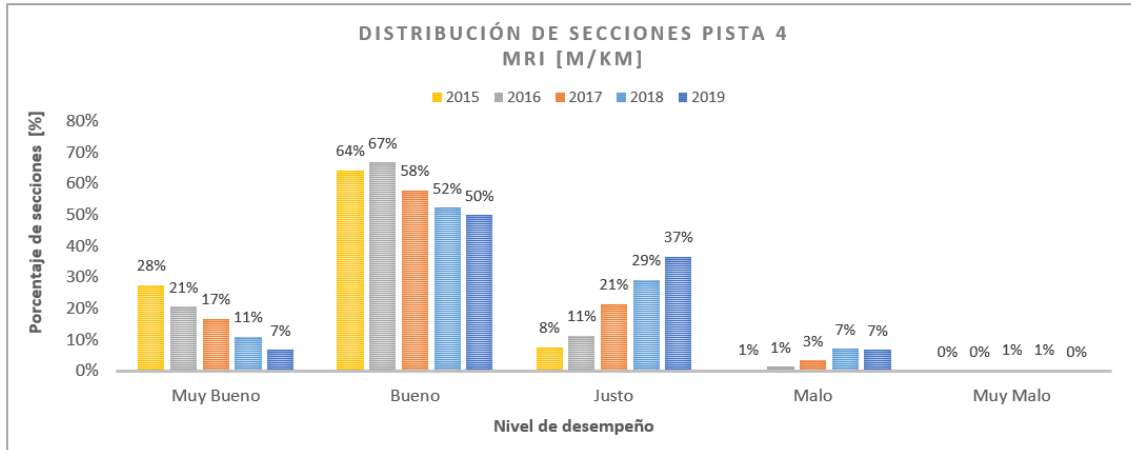
*\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.*

**Figura 3.2.13:** Evolución temporal del ratio de capacidad estructural (Tramif: 1km) - Pista 3.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.2.4. Pista 4

#### a) Regularidad longitudinal del pavimento

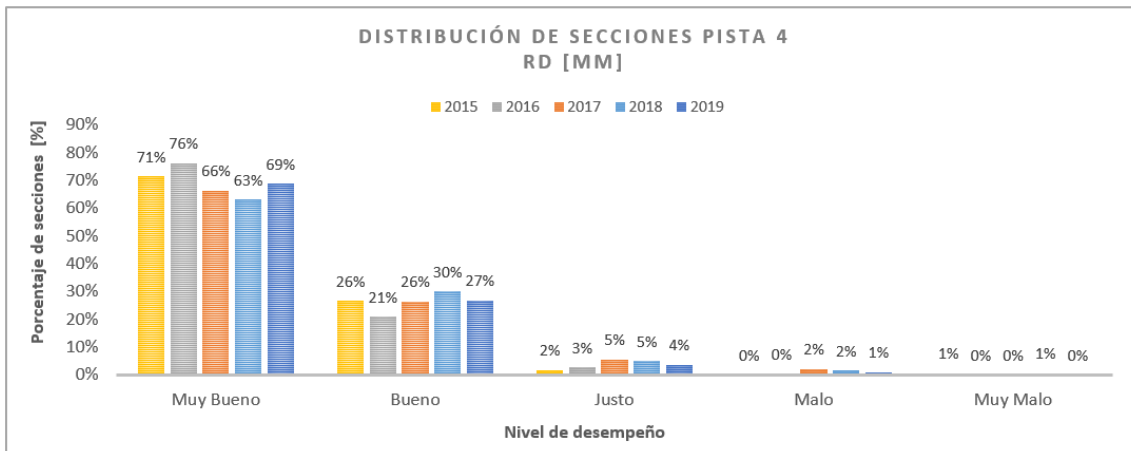


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.14:** Evolución temporal del indicador MRI - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

#### b) Regularidad transversal del pavimento

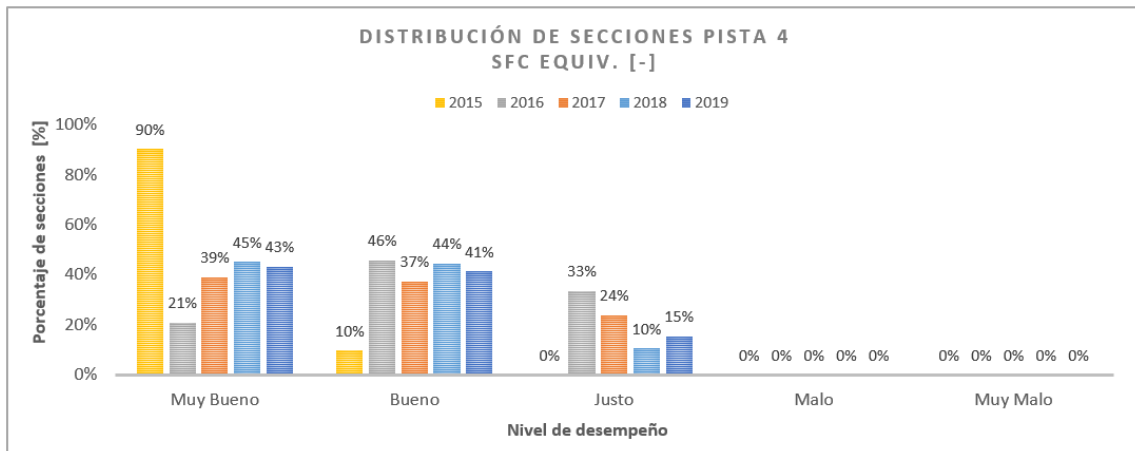


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.15:** Evolución temporal del indicador RD - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

**c) Resistencia al deslizamiento**

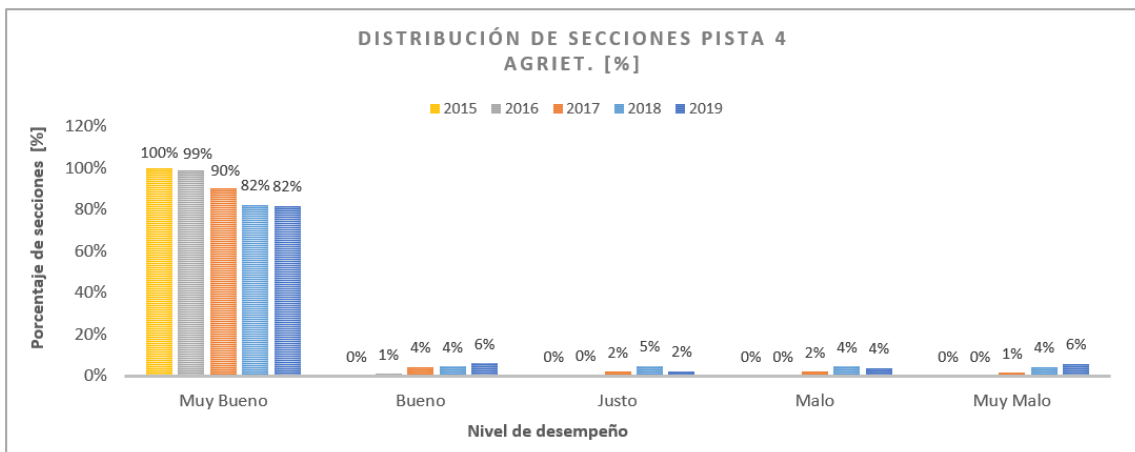


\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.16:** Evolución temporal del indicador SFC equiv. - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

**d) Porcentaje de agrietamiento**



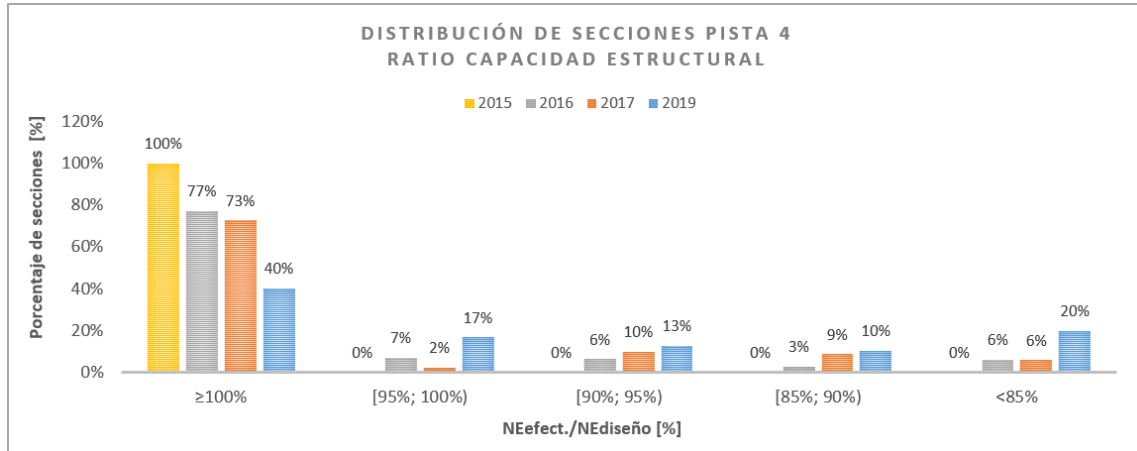
\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.17:** Evolución temporal del indicador Porcentaje de agrietamiento - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

**e) Ratio NEfectivo/NEdiseño**

A modo de visualizar la capacidad estructural de la pista 4 se tiene la distribución de las secciones según una escala teórica. En la Figura 3.2.18 se muestra la cantidad de secciones según la tramificación estructural cada 1 km.



\*Los porcentajes se encuentran redondeados a la unidad para mejor visualización.

**Figura 3.2.18:** Evolución temporal del ratio de capacidad estructural (Tramif: 1km) - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

**3.2.5. Análisis general de la evolución de indicadores**

A partir de las gráficas presentadas para cada una de las pistas se puede concluir lo siguiente:

**Pista 1**

El porcentaje de secciones en el nivel Muy Bueno (equivalente a 0% de pérdida) es de al menos 90%, 62% y 98% para los indicadores RD, SFC equiv. y Agrietamiento, respectivamente. Para el indicador MRI, el porcentaje de secciones sin pérdida varía entre 35% y 51%. Esto significa que el porcentaje restante de secciones tiene asociado algún grado de pérdida de valor patrimonial.

Un porcentaje menor de secciones se encuentra en los niveles Malo y/o Muy Malo (equivalente a 100% o 200% del costo de rehabilitación). Para el indicador RD, 0.3% de secciones se encuentran en el nivel Malo en los años 2017-2019. Para el Agrietamiento, en el año 2019 hay 0.3% de secciones en los niveles Malo y Muy Malo, respectivamente (0.3% representa a una sección de 200 m).

**Pista 2**

El porcentaje de secciones en el nivel Muy Bueno es de al menos 87 %, 70 % y 82 % para los indicadores RD, SFC equiv. y Agrietamiento, respectivamente (excepto para el indicador SFC equiv. el año 2018, donde las secciones en este nivel alcanzan solo un 40 %). Para el indicador MRI, el porcentaje de secciones varía entre 41 % y 55 %.

Para el indicador RD, 0.5 % de las secciones se encuentran en nivel Malo en el año 2018 (0.5 % representa a dos secciones de 200 m). Para el Agrietamiento, en el año 2018 y 2019 hay secciones en los niveles Malo y Muy Malo, con porcentajes entre 1.6 y 4.5 %.

**Pista 3**

El porcentaje de secciones en el nivel Muy Bueno es de al menos 73 % y 85 % para los indicadores RD y Agrietamiento, respectivamente. Para el indicador MRI, el porcentaje de secciones varía entre 19 % y 41 %, mientras que para el SFC equiv. varía entre 43 % y 58 %, excepto para el año 2015 donde alcanza el 100 %.

Todos los indicadores superficiales tienen secciones en los niveles Malo y/o Muy Malo para algún año de evaluación, excepto el indicador SFC equiv.

**Pista 4**

El porcentaje de secciones en el nivel Muy Bueno es de al menos 63 % y 82 % para los indicadores RD y Agrietamiento, respectivamente. Para el indicador MRI, el porcentaje de secciones varía entre 7 % y 28 %, mientras que para el SFC equiv. varía entre 21 % y 45 %, excepto para el año 2015 donde alcanza el 90 %.

Todos los indicadores superficiales tienen secciones en los niveles Malo y/o Muy Malo para algún año de evaluación, excepto el indicador SFC equiv.

Finalmente y a modo general para las cuatro pistas, el comportamiento de las secciones evaluadas es distribuirse en los primero tres niveles de desempeño (MB, B o J) y la tendencia de los indicadores es disminuir de nivel con el paso del tiempo, lo que se transforma en un aumento de pérdida de valor en el activo.

### 3.3. Consideraciones para el costo histórico y de rehabilitación

Para poder aplicar el método de valorización del patrimonio vial es necesario contar con los costos de construcción y de rehabilitación de las secciones de pavimento evaluadas. Las partidas y precios unitarios considerados son los descritos en los contratos de licitación más recientes (MOP, 2019-a; MOP, 2021) y son detallados en la Tabla 3.3.1. A falta de información de las características de los materiales que componen la estructura de pavimento, se asume que la base granular tiene un  $\text{CBR} \geq 80\%$ , de acuerdo con las disposiciones del Manual de Carreteras (MOP, 2019-b). El ancho de pista es de 3.5 m.

**Tabla 3.3.1:** Partidas, bases de medición y precios unitarios considerados para el costo histórico (MOP, 2019-a; MOP, 2021).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	P.U. (UF)
209-1	Preparación de la Subrasante	$m^2$	0.0191
302-1	Base Granular, $\text{CBR} \geq 80\%$	$m^3$	0.6274
401-1	Imprimación	$m^2$	0.039
402-1	Riego de Liga	$m^2$	0.0206
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	6.0847
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	5.9113

Se consideran las secciones de 200 m de longitud con los espesores promedios de cada tramo de la ruta, de acuerdo con la información de la Tabla 3.1.1. Cabe mencionar, que en el cálculo del costo histórico solo se consideran las secciones de la Tabla 3.1.2 a modo de ser equivalentes con el cálculo del costo de rehabilitación.

Para el costo de rehabilitación se emplean las actividades de rehabilitación asociadas a cada uno de los indicadores técnicos. Las partidas y precios unitarios utilizados son descritos en la Tabla 3.3.2. A falta de información del costo del microaglomerado caliente (ítem 416-1) se considera un 30 % adicional al costo del concreto asfáltico de rodadura (ítem 408-1), de acuerdo con experiencias prácticas. Al igual que para el costo histórico, se consideran las secciones de 200 m de longitud y las dimensiones respectivas para cada tramo.

**Tabla 3.3.2:** Partidas, bases de medición y precios unitarios considerados para el costo de rehabilitación (MOP, 2019-a; MOP, 2021).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	P.U. (UF)
209-1	Preparación de la Subrasante	$m^2$	0.0191
302-1	Base Granular, $\text{CBR} \geq 80\%$	$m^3$	0.6274
401-1	Imprimación	$m^2$	0.039
402-1	Riego de Liga	$m^2$	0.0206
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	6.0847
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	5.9113
416-1	Microaglomerado caliente	$m^3$	7.9101
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	0.0402

Para el costo asociado a la demarcación del pavimento se consideran las partidas y precios unitarios presentados en la Tabla 3.3.3.

**Tabla 3.3.3:** *Partidas, bases de medición y precios unitarios considerados para el costo por demarcación del pavimento (MOP, 2019-a; MOP, 2021).*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.* [UF]
5.700	ELEMENTOS DE CONTROL Y SEGURIDAD			
704-3	Demarcación, Líneas Segmentadas de Separación de Pistas	Km	0.2*	15.0120
704-7	Demarcación, Línea Lateral Continua	Km	0.2*	17.2534
705-1	Tachas Reflectantes	N°	96*	0.1739

\*Considerando secciones de 200 m de longitud.

En función de los antecedentes disponibles, debido a que los precios unitarios de las bases de licitación incluyen gastos generales y utilidades, no se considerará un porcentaje adicional a los costos ya descritos.

### 3.4. Resultados de valorización

Para analizar de mejor forma los resultados al aplicar el método de valorización, se separan los resultados por el tipo de pista de la ruta. En primer lugar, se presentan los resultados para las pistas rápidas (1 y 2) que solo cuentan con información de los indicadores superficiales (MRI, RD, SFC equiv. y Agrietamiento).

En segundo lugar, se presentan los resultados para las pistas lentas (3 y 4) que tienen información de todos los indicadores involucrados en el cálculo. Para ambos casos se considerará la valorización solo por el desempeño del pavimento (asociada a los indicadores técnicos), y luego incluyendo el costo por demarcación.

A continuación, se presenta la nomenclatura utilizada para mejor comprensión:

- CH: Costo histórico, en [UF].
- CRehab: Costo de rehabilitación por desempeño, en [UF].
- Pérdida: Porcentaje de pérdida de valor, obtenido como  $Pérdida = CRehab/CH[\%]$ .
- VP: Valor de la pista, obtenido como  $VP = CH - CRehab$ , en [UF].
- CDem: Costo por demarcación del pavimento, en [UF].
- CRtotal: Costo de rehabilitación total (desempeño más demarcación), en [UF].
- VPtotal: Valor total de la pista incluyendo todos los costos,  $VPtotal = CH - CRtotal$ , en [UF].
- Pérdida total: Porcentaje de pérdida de valor, obtenido como  $Pérdida_{total} = CRtotal/CH[\%]$ .

Se presentan los resultados finales del método y algunos detalles que explican los valores obtenidos. También se presentan los costos asociados a cada indicador técnico con el objetivo de evaluar cómo influye cada uno en la pérdida de valor de las pistas. Mayor detalle de los gráficos o resultados presentados se encuentran en el Apéndice C.3.

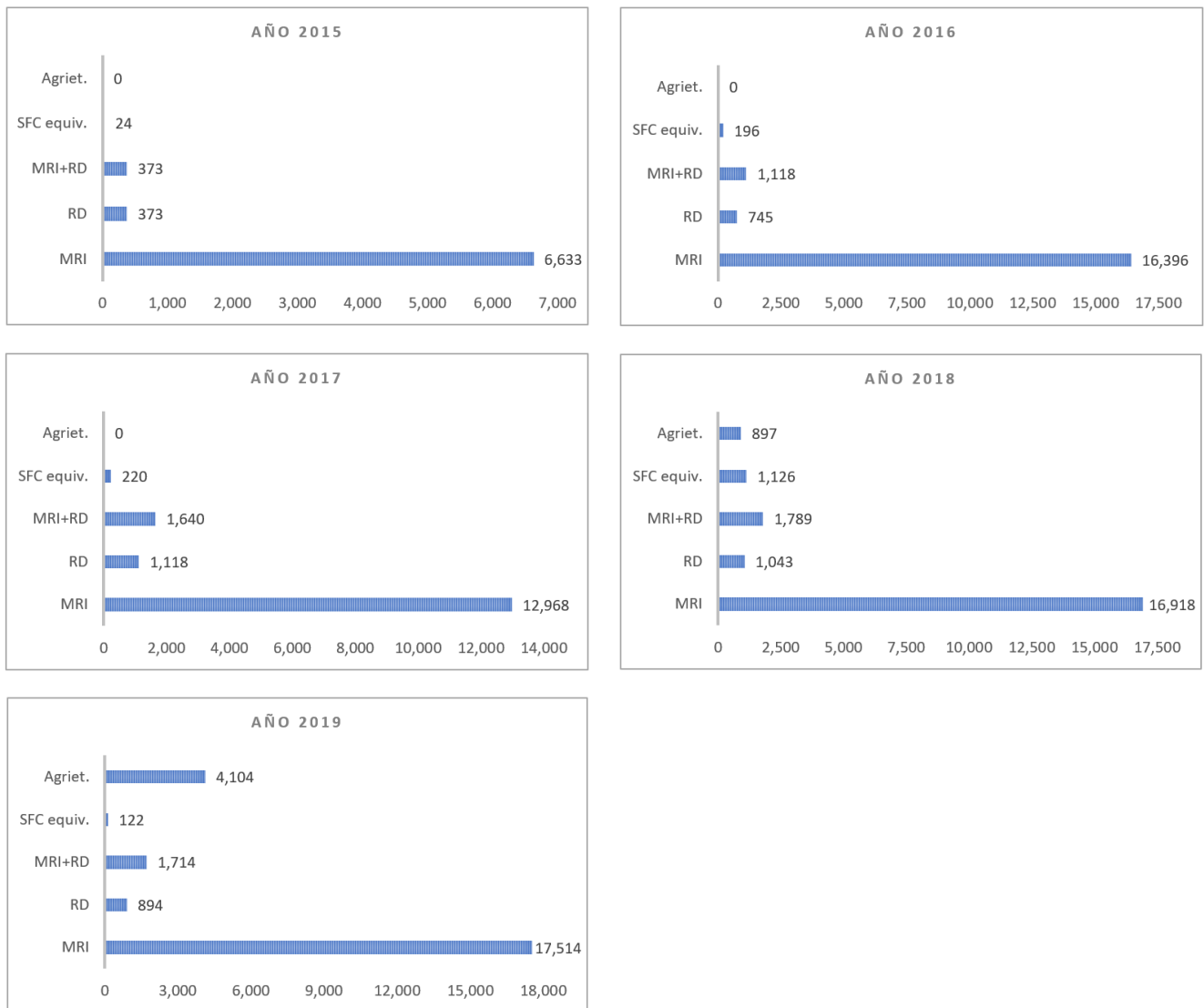
#### 3.4.1. Pista 1

Al aplicar el método a los datos de la pista 1 se obtienen los resultados de la Tabla 3.4.1, mientras que en la Figura 3.4.1 se visualiza la distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico, considerando la expresión de la Ecuación 2.3.7. Es decir, todas las secciones donde el mayor costo se debe al agrietamiento, por ejemplo, se suma el costo de rehabilitación de todas estas y se asocia al indicador.

Un aspecto importante por destacar es que los resultados de los años 2016-2019 son equivalentes debido a que el porcentaje de kilómetros que se están evaluando es similar (entre 87%-89%), a diferencia del año 2015 (42%). Se ha incluido en el análisis el año 2015 para determinar cuanta pérdida podría estar ignorándose en el cálculo por no contar con la totalidad de la ruta evaluada.

**Tabla 3.4.1:** Resultados metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 1.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	332,170	330,496	335,688	335,688
CRhab [UF]	\$7,403	18,456	15,946	21,773	24,349
Pérdida [%]	4.72 %	5.56 %	4.82 %	6.49 %	7.25 %
VP [UF]	149,363	313,714	314,550	313,915	311,339



**Figura 3.4.1:** Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 1.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que los indicadores MRI y RD tienen la misma actividad de rehabilitación y hay secciones de la pista que tienen igual nivel de desempeño para ambos indicadores, por ejemplo, “Bueno”, se distingue el indicador “MRI+RD” cuando el mayor costo por sección (Ecuación 2.3.7) corresponde a ambos indicadores.

Como puede observarse de las gráficas, para los cinco años de evaluación, el mayor costo se asocia al indicador MRI. Esto se debe a que hay un mayor porcentaje de secciones en un nivel de desempeño distinto al Muy Bueno (Figura 3.2.1) y la actividad de rehabilitación correspondiente (repavimentación de 60 mm de espesor) es la de segundo mayor costo tras la repavimentación total de capas asfálticas. La cantidad de kilómetros con un porcentaje de pérdida asociado a este indicador varía entre un 43 % y 57 % del total evaluado (detalle de la cantidad de secciones por cada indicador en Apéndice C.3.1).

El costo asociado a cada nivel de desempeño de los indicadores y su efecto con respecto al valor de una pista se presenta en la Sección 3.6 para tener un mejor análisis e interpretación.

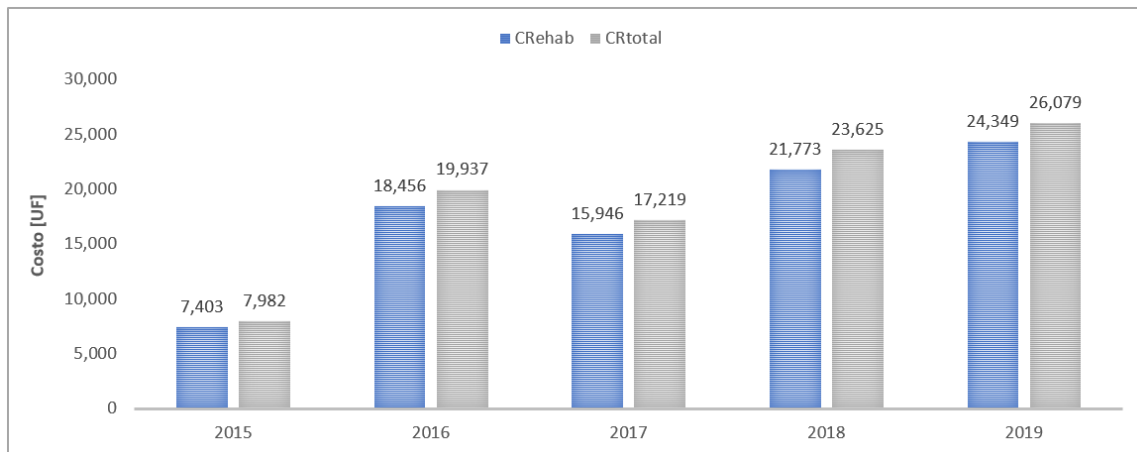
Por otra parte, al considerar el costo por demarcación del pavimento se obtienen los parámetros de la Tabla 3.4.2. Cabe destacar que cada sección de pavimento que tiene asociado un costo por desempeño tiene un costo por demarcación de un valor de máximo de UF 46.30, según el último contrato de concesiones (MOP, 2019-a). Este valor puede variar en función del nivel de desempeño de los indicadores.

**Tabla 3.4.2:** Resultados metodología de valorización - Pista 1.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	332,170	330,496	335,688	335,688
CRehab [UF]	7,403	18,456	15,946	21,773	24,349
CDem [UF]	579	1,481	1,273	1,852	1,730
CRtotal [UF]	7,982	19,937	17,219	23,625	26,079
Pérdida total [%]	5.09%	6.00%	5.21%	7.04%	7.77%
VP total [UF]	148,784	312,233	313,276	312,063	309,609

Con respecto al parámetro “pérdida de valor” se aprecia una tendencia al aumento con una variación anual de 1 % aproximadamente, lo que es consistente con la disminución del desempeño de los indicadores técnicos.

De forma gráfica, en la Figura 3.4.2 se presenta la evolución del costo de rehabilitación por desempeño (CRehab) y el costo de rehabilitación total (CRtotal). En los valores se puede distinguir una leve disminución en el año 2017 que podría relacionarse a alguna actividad de rehabilitación ejecutada en la pista, ya que al menos, el indicador MRI presenta una mejora en su desempeño (Figura 3.2.1).



**Figura 3.4.2:** Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 1.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2. Pista 2

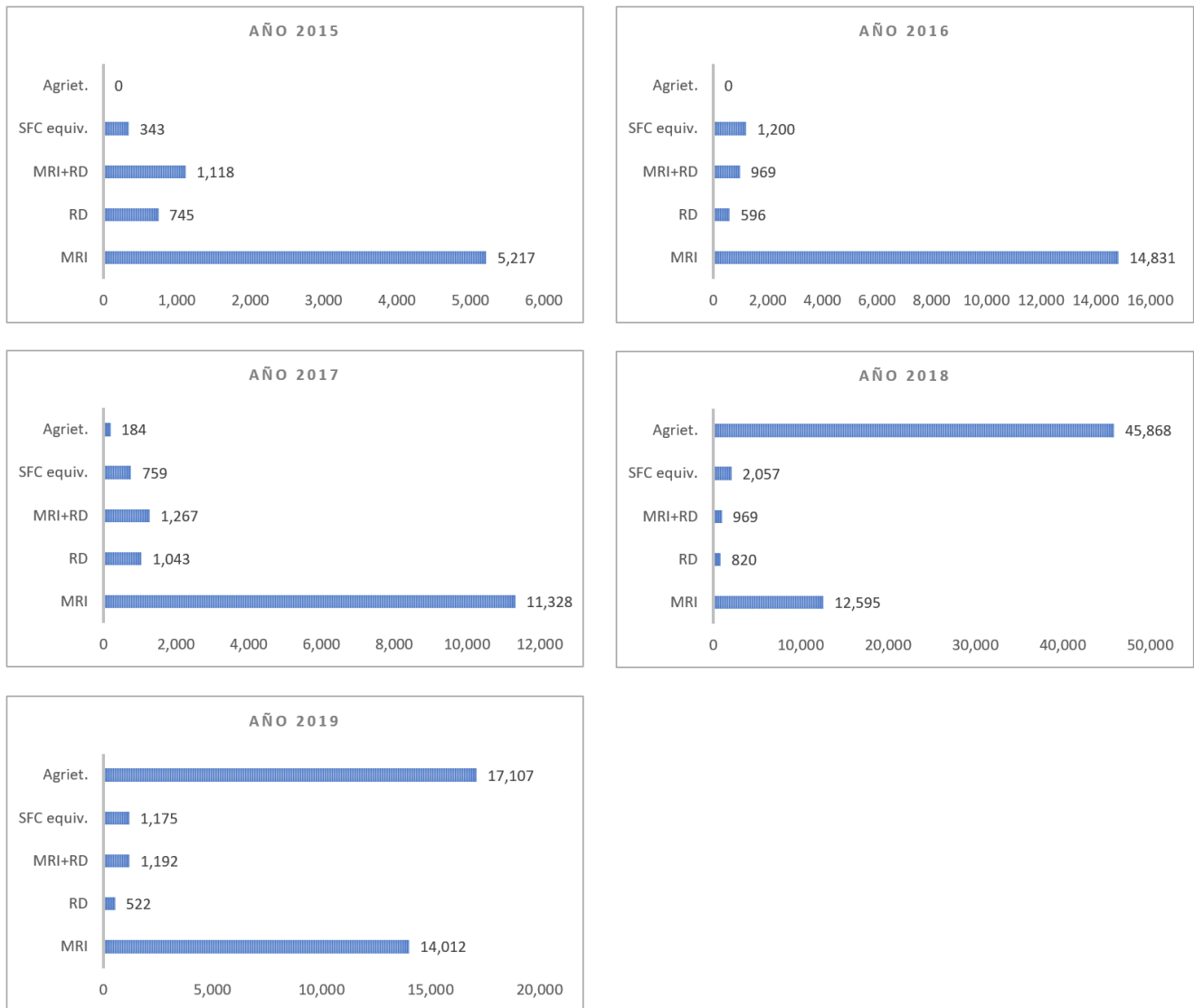
Cuando se aplica el método a los datos de la pista 2, se obtienen los resultados de la Tabla 3.4.3. En la Figura 3.4.3 se visualiza la distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico para cada año de evaluación, donde la cantidad de secciones asociadas a cada costo se detalla en el Apéndice C.3.2.

Al igual que para la pista 1, un aspecto importante a destacar es que los resultados de los años 2016-2019 son equivalentes debido a que el porcentaje de kilómetros que se están evaluando es similar (entre 84 %-86 %), a diferencia del año 2015 (42 %).

**Tabla 3.4.3:** Resultados de metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 2.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	325,010	322,468	326,769	325,942
CRehab [UF]	7,423	17,596	14,582	62,309	34,007
Pérdida [%]	4.74 %	5.41 %	4.52 %	19.07 %	10.43 %
VP [UF]	149,343	307,414	307,885	264,460	291,935

Como puede observarse de las gráficas, el mayor costo se asocia al indicador MRI en los años 2015-2017, mientras que el mayor costo para los años 2018 y 2019 se asocia al Agrietamiento. Lo anterior se debe a que durante los dos últimos años, a diferencia de los primeros tres, disminuyó el desempeño de este indicador, existiendo incluso un porcentaje de secciones con nivel de agrietamiento en los niveles de desempeño Malo y Muy Malo (Figura 3.2.8). El costo asociado a estos niveles es de un 100% y 200% del costo de una repavimentación total, respectivamente. Por otra parte, la cantidad de kilómetros con algún porcentaje de pérdida asociada a este indicador es de 13.6 km (2018) y de 4.2 km (2019).



**Figura 3.4.3:** Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 2.

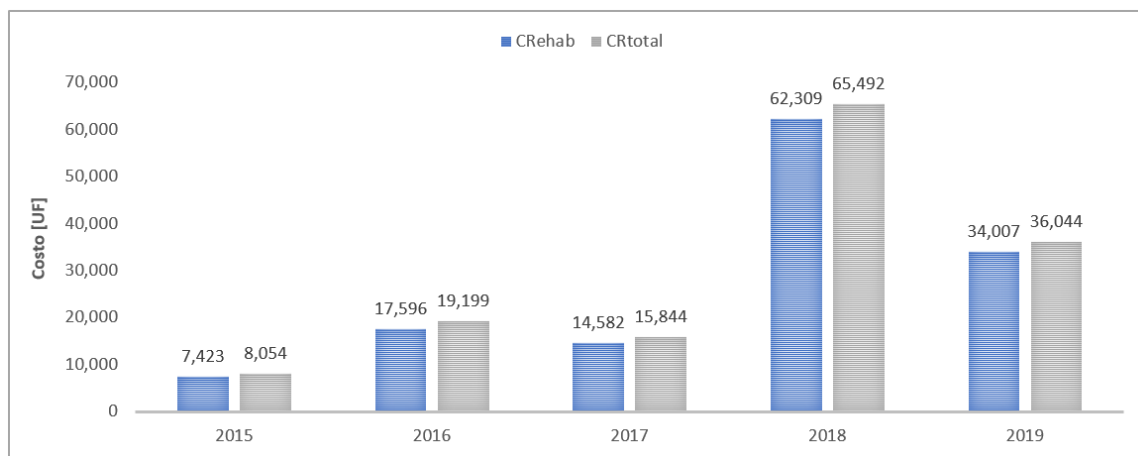
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, al considerar el costo por demarcación se obtienen los parámetros de la Tabla 3.4.3. Con respecto a la pérdida de valor, se puede distinguir el aumento en el año 2018 que se relaciona directamente con las secciones que tienen porcentajes de agrietamiento muy altos (Figura 3.2.8). Entre los años 2015-2017 la variación anual es cercana al 1%.

**Tabla 3.4.4:** Resultados metodología de valorización - Pista 2.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	325,010	322,468	326,769	325,942
CR rehab [UF]	7,423	17,596	14,582	62,309	34,007
CDem [UF]	631	1,603	1,262	3,183	2,037
CRtotal [UF]	8,054	19,199	15,844	65,492	36,044
Pérdida total [%]	5.14 %	5.91 %	4.91 %	20.04 %	11.06 %
VP total [UF]	148,712	305,811	306,624	261,277	289,898

De forma gráfica, en la Figura 3.4.4 se presenta la evolución del costo de rehabilitación por desempeño (CR rehab) y el costo de rehabilitación total (CRtotal).

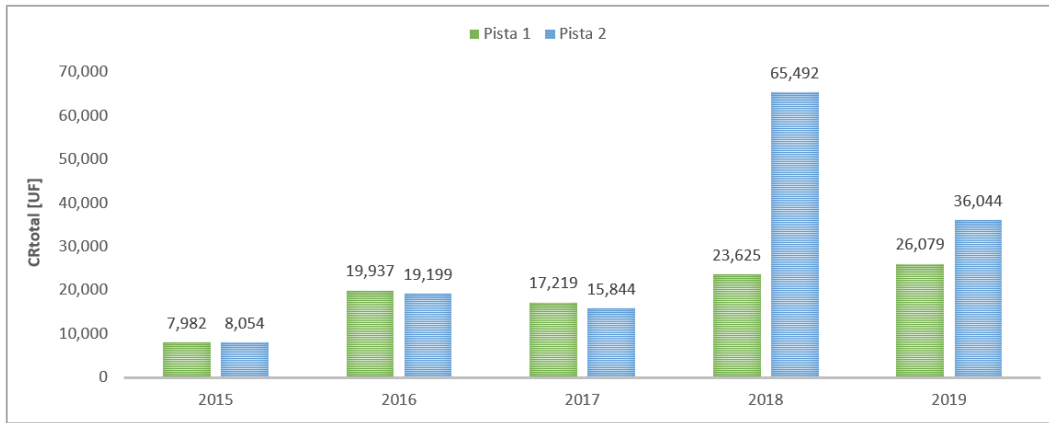


**Figura 3.4.4:** Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 2.

Fuente: Elaboración propia.

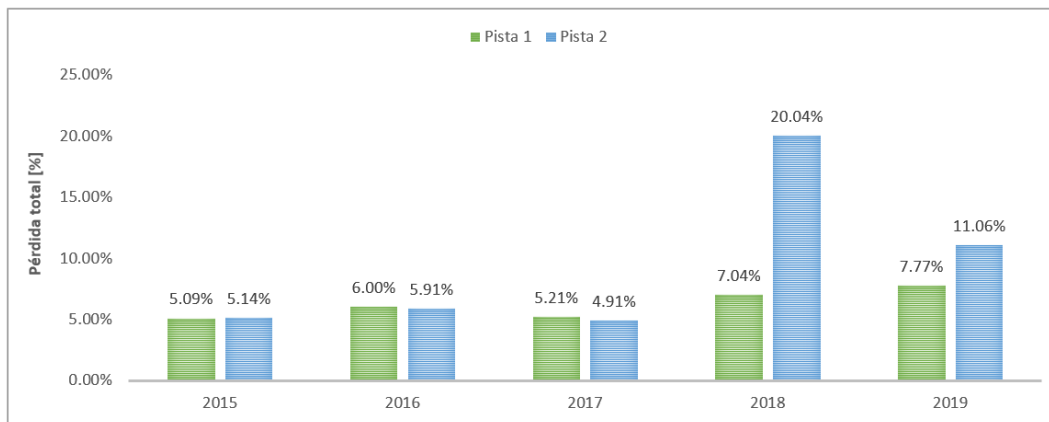
Por último, a modo de comparación entre las dos pistas rápidas de la vía se tienen los gráficos de la Figura 3.4.5 y 3.4.6. El primero presenta la evolución temporal del costo de rehabilitación total y el segundo, el porcentaje de pérdida total (ambos considerando solo desempeño y demarcación). Como se puede observar, para la mayoría de los años tanto los costos como el porcentaje de pérdida son similares en ambas pistas, excepto para el año 2018, donde la diferencia de costo entre ambas pistas alcanza las UF 40,000.

La similitud de los valores se puede deber tanto al diseño y construcción de las pistas como al uso y mantenimiento que reciben. Es importante recalcar que el método no consideró la capacidad estructural del pavimento, por lo que los costos de rehabilitación podrían ser mayores a los obtenidos. Sin embargo, las pistas rápidas son solicitadas principalmente por vehículos livianos, que no producen grandes esfuerzos en el pavimento.



**Figura 3.4.5:** Evolución temporal del costo de rehabilitación total - Pistas 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.4.6:** Evolución temporal del porcentaje de pérdida total de valor - Pistas 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3. Pista 3

Para el caso de las pistas lentas se cuenta con información de los NE efectivos, por lo que es posible incluir la capacidad estructural en el cálculo. Dado que se han hecho tres propuestas de tramificación, a continuación se presentan los resultados al utilizar la segmentación por secciones de 1 km, sin embargo, en la Sección 3.5 se realizará un análisis comparativo de las distintas metodologías a partir de los parámetros obtenidos.

Al aplicar el método a los datos de la pista 3 se obtienen los resultados de la Tabla 3.4.5, mientras que en la Figura 3.4.7 se visualiza la distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico. Es importante mencionar que para el año 2018 no se cuenta con información de deflectometría de impacto.

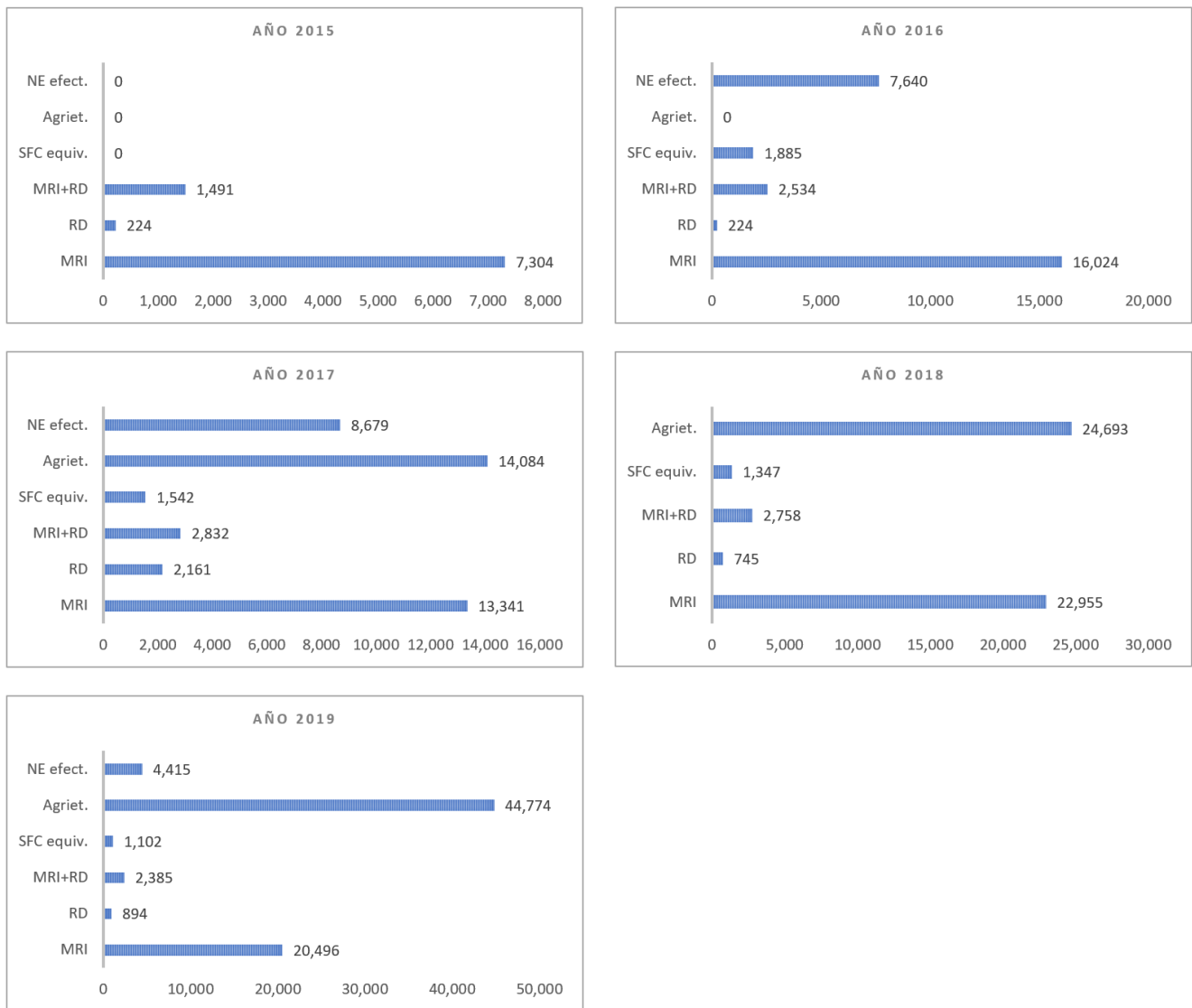
**Tabla 3.4.5:** *Resultados metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 3.*

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	331,216	327,083	338,317	332,278
CRehab [UF]	9,018	28,307	42,640	52,497	74,065
Pérdida [%]	5.75 %	8.55 %	13.04 %	15.52 %	22.29 %
VP [UF]	147,748	302,910	284,443	285,820	258,213

Como puede observarse, para el año 2015 los costos se asocian a MRI (mayormente) y RD. Esto se debe a que en los otros indicadores el 100% de las secciones se encuentra en el nivel Muy Bueno. Por otra parte, para los años 2016, 2017 y 2019, las pérdidas por capacidad estructural no son superiores a los costos por MRI o Agriet., ya que el porcentaje de secciones con pérdida no representa más del 25% (Figura 3.2.13), además se debe considerar la subestimación de los costos debido a la actividad de rehabilitación.

En el año 2018 casi la totalidad del costo de rehabilitación se debe al Agriet. (47%) y MRI (43%). Estos valores son similares a pesar de que el porcentaje de secciones en nivel Muy Bueno es de 92% y 22%, respectivamente. Es decir, 8% y 78% de secciones tiene un porcentaje de pérdida. Esto se debe a que las secciones con Agriet. en nivel Malo o Muy Malo (alrededor de 4%) tiene una mayor penalización.

Por último, en el año 2019 el mayor costo se debe al agrietamiento, relacionado principalmente con las secciones en niveles Malo o Muy Malo (2% y 6%, respectivamente). El detalle de la cantidad de secciones por cada indicador se encuentra en el Apéndice C.3.3.



**Figura 3.4.7:** Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 3.

Fuente: Elaboración propia.

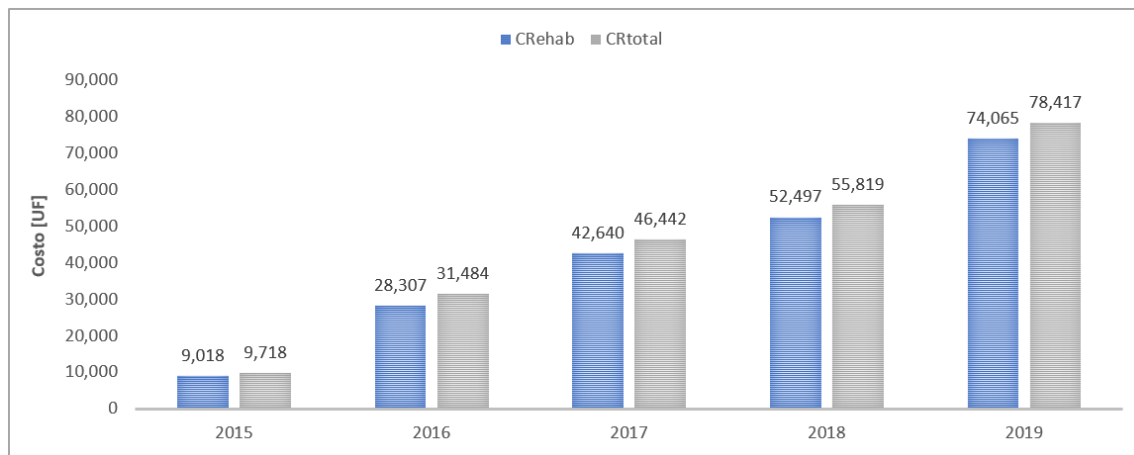
Por otra parte, al considerar el costo por demarcación se obtienen los parámetros de la Tabla 3.4.6.

**Tabla 3.4.6:** Resultados metodología de valorización - Pista 3.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	331,216	327,083	338,317	332,278
CRehab [UF]	9,018	28,307	42,640	52,497	74,065
CDem [UF]	700	3,177	3,802	3,322	4,352
CRtotal [UF]	9,718	31,484	46,442	55,819	78,417
Pérdida total [%]	6.20%	9.51%	14.20%	16.50%	23.60%
VP total [UF]	147,048	299,733	280,641	282,498	253,861

Con respecto al parámetro “pérdida de valor” se aprecia una tendencia al aumento con una variación anual de 4% aproximadamente, lo que es consistente con la disminución del desempeño de los indicadores técnicos.

De forma gráfica, en la Figura 3.4.8 se presenta la evolución del costo de rehabilitación por desempeño (CRehab) y el costo de rehabilitación total (CRtotal).



**Figura 3.4.8:** Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 3 (Tramif:1km).

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados se concluye que el costo de rehabilitación en el año 2015 es sumamente inferior a los otros años debido a la cantidad de kilómetros que se está evaluando. Por otra parte, los costos tienden a aumentar con los años, sin embargo, hay que considerar que los cálculos se obtuvieron sabiendo que existe una subestimación con respecto a los costos debido a la disminución de capacidad estructural del pavimento.

### 3.4.4. Pista 4

Al igual que para la pista 3, a continuación se presentan los resultados al utilizar la tramificación por secciones de 1 km. Al aplicar el método a los datos de la pista 4 se obtienen los resultados de la Tabla 3.4.7, mientras que en la Figura 3.4.9 se visualiza la distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico.

**Tabla 3.4.7:** Resultados metodología de valorización por desempeño del pavimento - Pista 4.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	320,409	299,418	328,422	307,215
CRehab [UF]	12,197	33,841	51,256	77,366	88,016
Pérdida [%]	7.78 %	10.56 %	17.12 %	23.56 %	28.65 %
VP [UF]	144,569	286,568	248,162	251,057	219,199

El comportamiento de los costos es similar a la pista 3. En el año 2015, los costos se deben principalmente al MRI, que es el indicador que tiene peor desempeño para ese año, con solo un 28 % de las secciones en nivel Muy Bueno.

Tanto para los años 2016, 2017 y 2019, las pérdidas por capacidad estructural no son superiores a los costos por MRI o Agrietamiento, ya que el porcentaje de secciones con pérdida no representa más del 27 % (Figura 3.2.18), excepto el año 2019 donde se alcanza el 60 %. Sin embargo, se debe considerar la subestimación de los costos debido a la actividad de rehabilitación.

En el año 2018 casi la totalidad del costo de rehabilitación se debe al Agriet. (59 %) y MRI (35 %), esto se debe a pesar de que la mayoría de las secciones tiene un porcentaje de pérdida por MRI. Las secciones con pérdida debido al agrietamiento alcanzan los 13.2 km, pero aquellas con un nivel Malo o Muy Malo (alrededor de 8 %) tiene una mayor penalización debido al costo de la actividad.

Por último, en el año 2019 el mayor costo se debe a Agriet., donde hay un 4 % de secciones en nivel Malo y 6 % de secciones en Muy Malo. El detalle de la cantidad de secciones por cada indicador se encuentra en el Apéndice C.3.4.



**Figura 3.4.9:** Distribución del costo de rehabilitación por indicador técnico - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

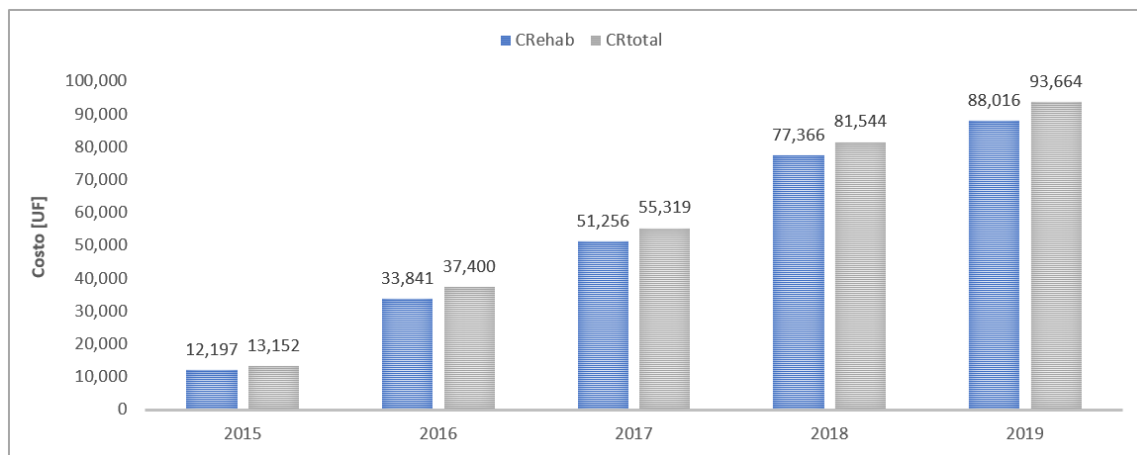
Por otra parte, al considerar el costo por demarcación se obtienen los parámetros de la Tabla 3.4.8.

**Tabla 3.4.8:** Resultados metodología de valorización - Pista 4.

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	320,409	299,418	319,557	307,215
CRehab [UF]	12,197	33,841	51,256	77,225	88,016
CDem [UF]	955	3,559	4,062	4,178	5,648
CRtotal [UF]	13,152	37,400	55,319	81,544	93,664
Pérdida total [%]	8.39%	11.67%	18.48%	24.83%	30.49%
VP total [UF]	143,614	283,009	244,099	246,878	213,551

Con respecto al parámetro “pérdida de valor” se aprecia una tendencia al aumento con una variación anual de 5.5 % aproximadamente, lo que es consistente con la disminución del desempeño de los indicadores técnicos.

De forma gráfica, en la Figura 3.4.10 se presenta la evolución del costo de rehabilitación por desempeño (CRehab) y el costo de rehabilitación total (CRtotal).



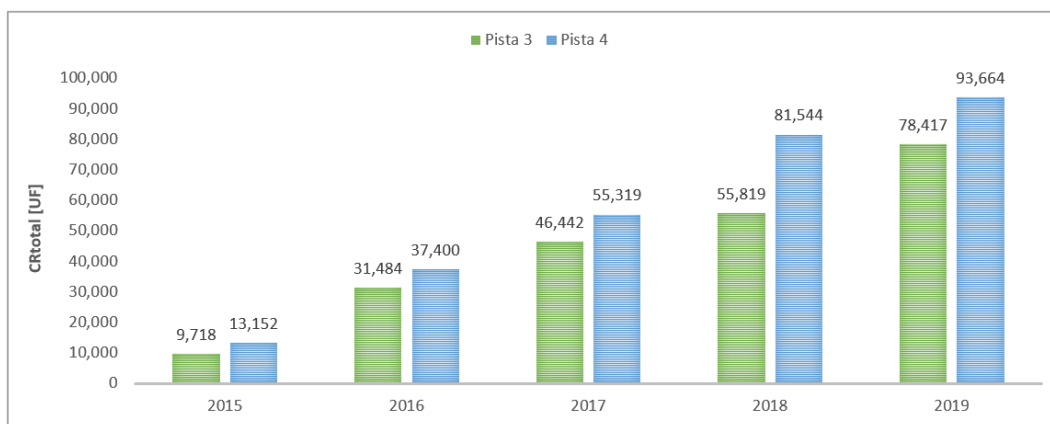
**Figura 3.4.10:** Evolución temporal de los costos de rehabilitación - Pista 4.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que para la pista 3, se concluye que el costo de rehabilitación en el año 2015 es sumamente inferior a los otros años debido a la cantidad de kilómetros evaluados. Por otra parte, los costos tienden a aumentar con los años, sin embargo, hay que considerar que los cálculos se obtuvieron sabiendo que existe una subestimación con respecto a los costos debido a la disminución de capacidad estructural del pavimento. Lo anterior podría producir una tendencia distinta y diferenciar los años con información de deflectometría (2015-2017 y 2019) de aquel año sin información (2018).

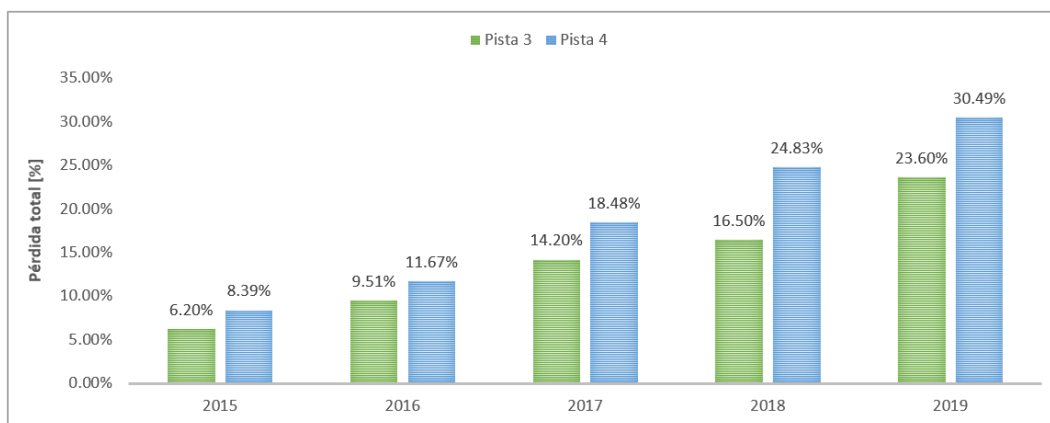
Por último, a modo de comparación entre las dos pistas lentas de la vía se tienen los gráficos de la Figura 3.4.11 y 3.4.12. El primero presenta la evolución temporal del costo de rehabilitación total y el segundo, el porcentaje de pérdida total. Como se puede observar, la pista 4 siempre tiene mayores costos de rehabilitación.

La diferencia entre los costos tiene una tendencia al aumento, esto se podría explicar tanto por el diseño y construcción de las pistas como por el uso y mantenimiento que reciben. Sin tener la información de las acciones de conservación, se podría pensar que la pista 4 ha recibido una menor mantención que su homóloga. Otro aspecto podría ser que recibe mayor concentración del tráfico vehicular pesado, generando mayores solicitaciones que afectan la capacidad estructural del pavimento.



**Figura 3.4.11:** Evolución temporal del costo de rehabilitación total - Pistas 3 y 4.

Fuente: Elaboración propia.

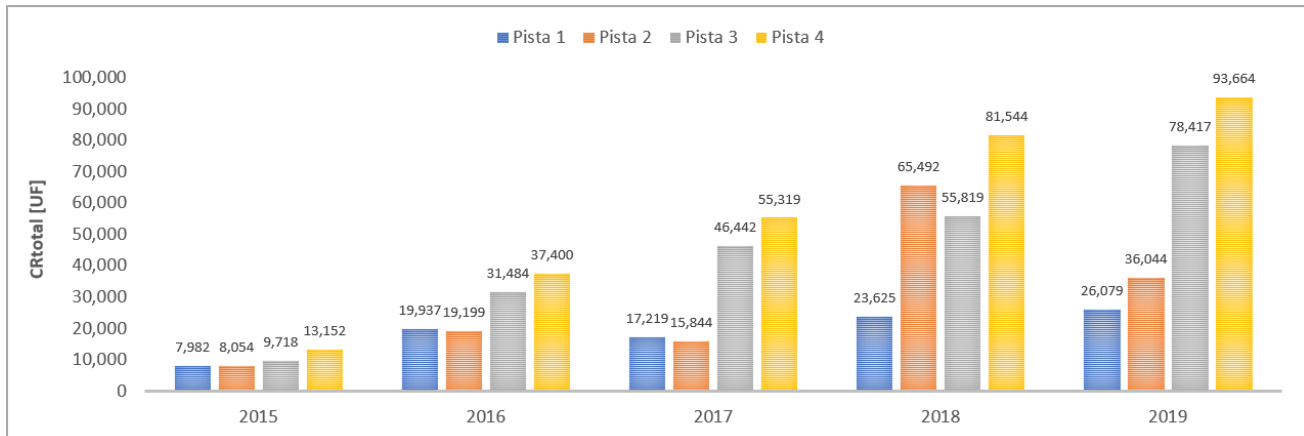


**Figura 3.4.12:** Evolución temporal del porcentaje de pérdida total de valor - Pistas 3 y 4.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.5. Comparación entre pistas

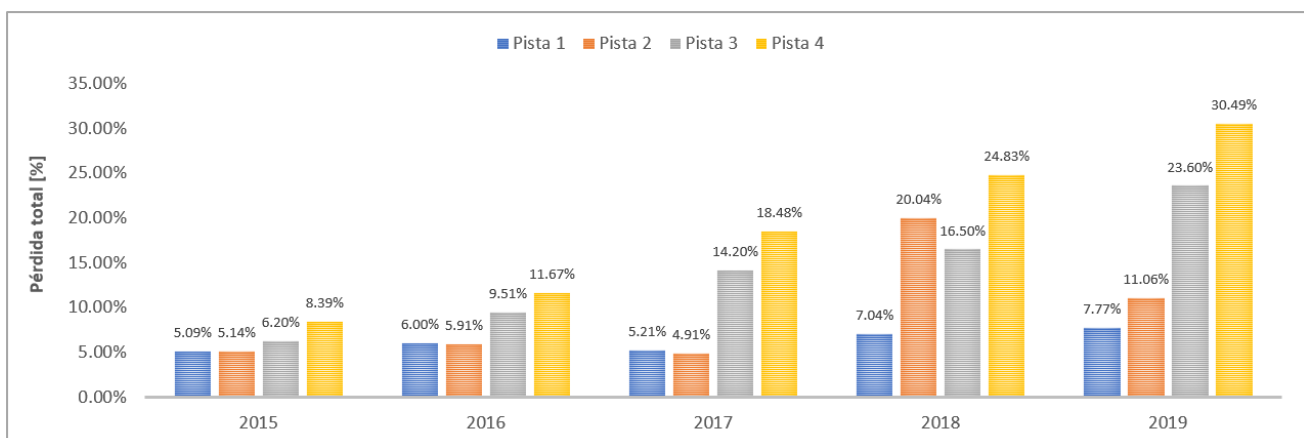
A modo de comparación entre las pistas rápidas y lentas, en la Figura 3.4.13 se presenta la evolución temporal del costo de rehabilitación (desempeño y demarcación) para cada una de las pistas. Como se puede observar, en el año 2015 el costo es similar en las cuatro pistas de la vía, sin embargo, a medida que avanza el tiempo el costo es mayor en las pistas 3 y 4.



**Figura 3.4.13:** Evolución temporal del costo de rehabilitación total - Pistas 1 a 4.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, se presenta la evolución del porcentaje de pérdida total en cada una de las pistas. En general, las pistas 1 y 2 tienen un porcentaje de pérdida constante a lo largo de los años, a excepción del año 2018 en la pista 2. Por el contrario, la pérdida va en aumento en las pistas 3 y 4. Esto se puede asociar a la falta de información de capacidad estructural para las pistas rápidas.



**Figura 3.4.14:** Evolución temporal del porcentaje de pérdida total - Pistas 1 a 4.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Comparación métodos de tramificación

Dado que este estudio hace diferentes propuestas para tramificar la capacidad estructural de los pavimentos, y en la sección anterior solo se presentan y comparan los resultados con un método de tramificación, a continuación serán comparadas las diferentes propuestas considerando como criterio el costo de rehabilitación por desempeño (CRehab [UF]) y el porcentaje de pérdida de valor (Pérdida [%]).

El objetivo es poder evaluar cómo afecta cada una de las propuestas en el valor de la vía estudiada, con el fin de contar también con el criterio económico al momento de validar la metodología de tramificación.

La nomenclatura utilizada para la segmentación estructural en las figuras es la siguiente:

- Tramificación 1 (T1) : por secciones de 1 km.
- Tramificación 2 (T2): en función de la longitud de los tramos de diseño (detalle en Tabla C.2.1).
- Tramificación 3 (T3): por método de diferencias acumuladas (detalle en Tabla C.2.2 y C.2.3).

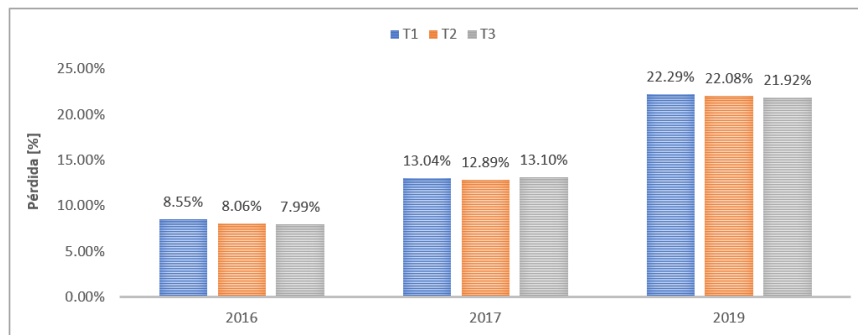
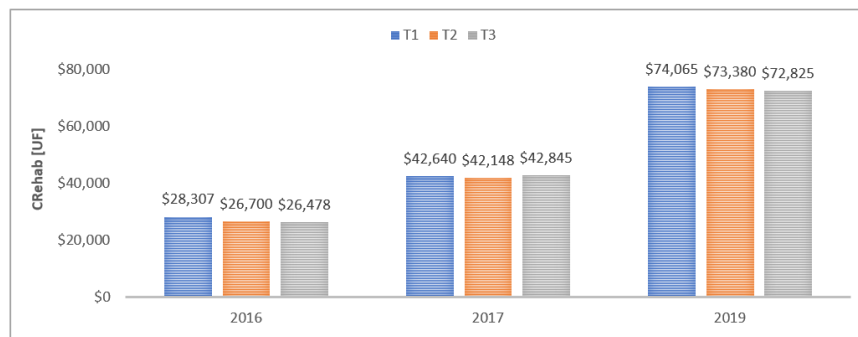
La comparación se realiza tanto para la pista 3 y 4 ya que ambas cuentan con información de deflectometría. Por otra parte, en el análisis solo se consideran los años 2016, 2017 y 2019 ya que estos tienen similar porcentaje de secciones evaluadas, de acuerdo con la información presentada en la Tabla 3.1.2.

Para poder determinar cómo influye el método de tramificación se presentan las gráficas de la Figura 3.5.1, donde se distinguen los parámetros considerados en la pista 3 (figura a) y 4 (figura b), respectivamente.

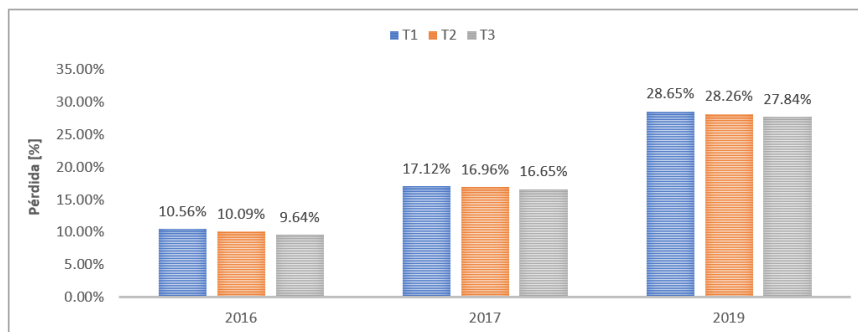
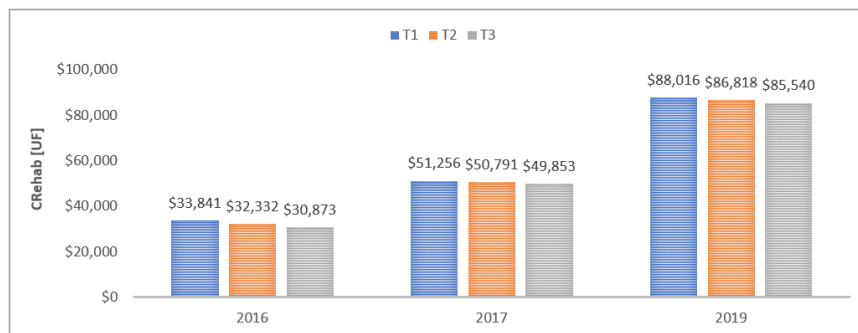
Como se puede observar, existe una tendencia clara sobre cual tramificación produce mayor costo de rehabilitación, siendo esta la tramificación 1. No obstante, las diferencias entre las tres segmentaciones no son significativas. Si se considera la diferencia entre los costos debido a cada método de tramificación, los rangos van entre UF 200 y 1,800 para la pista 3, y entre UF 460 y 3,000 para la pista 4. Esto refleja que la tramificación escogida no tiene mayor influencia en la valoración del pavimento.

A pesar de lo anterior y considerando lo presentado en la Sección 2.3.7.2, el objetivo de realizar una tramificación es caracterizar adecuadamente la capacidad estructural del pavimento y no alterar el valor del activo. La metodología de segmentación estructural debe ser escogida para representar con cierta confiabilidad la característica que se requiere, independiente de si genera mayor o menor costo de rehabilitación.

Para la vía estudiada se cuenta con datos de deflectometría de impacto cada 200 m, por lo que el valor característico considerando la tramificación cada 1 km se determina en base a solo 5 mediciones, por lo que en este caso, la tramificación 2 o 3 podría ser una mejor representación del estado del pavimento al considerar sectores de mayor longitud y más mediciones. En caso de realizar las mediciones de deflectometría de impacto cada 50 m, la tramificación cada 1 km se considera apropiada para la valoración patrimonial de una carretera.



a) Pista 3



b) Pista 4

**Figura 3.5.1:** *Parámetros de valoración según método de tramificación - Pista 3 y 4.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.6. Relación entre nivel de servicio y valor del activo

En esta sección se presenta la relación entre el nivel de servicio y el valor del activo. Esto se realiza mediante un análisis al costo de rehabilitación asociado a cada nivel de desempeño de los indicadores y su efecto con respecto al valor histórico del activo. Para esto, se selecciona un tramo de diseño del caso de estudio (tramo 1), donde cada sección de 200 m de longitud tiene un costo histórico de UF 826.70, según precios unitarios de MOP, 2019-a y MOP, 2021.

En la Tabla 3.6.1 se presenta el costo de rehabilitación por desempeño para cada indicador técnico (considerando una sección de 200 m de longitud). Este costo está asociado a las actividades de rehabilitación que se designan cuando los indicadores alcanzan el nivel de desempeño “Malo” y que son detalladas en la Tabla 2.3.12.

**Tabla 3.6.1:** Costo de rehabilitación según indicador técnico (precios unitarios MOP, 2019-a; MOP, 2021).

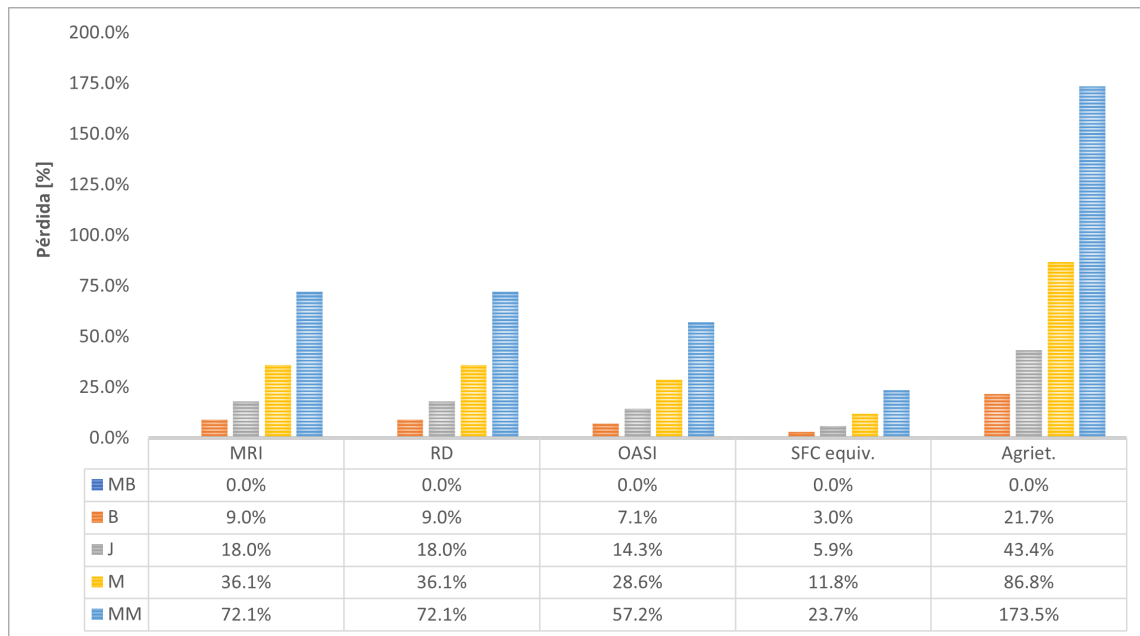
Indicador	Costo actividad rehabilitación [UF]
MRI	298.1
RD	298.1
OASI	236.4
SFC equiv.	97.9
Agriet.	717.3

Considerando los porcentajes respecto al costo de la actividad según el nivel de desempeño (0%, 25%, 50%, 100% y 200%), se tienen los valores de la Tabla 3.6.2. El porcentaje de pérdida de valor, obtenido como la razón entre el costo de rehabilitación y el costo histórico (para una sección de pavimento), se detalla en la Figura 3.6.1 donde se diferencia según indicador técnico y nivel de desempeño.

**Tabla 3.6.2:** Costo de rehabilitación en UF según nivel de desempeño del indicador técnico.

Indicador	Nivel de desempeño				
	MB	B	J	M	MM
MRI	0.00	74.53	149.06	298.12	596.23
RD	0.00	74.53	149.06	298.12	596.23
OASI	0.00	59.09	118.18	236.36	472.72
SFC equiv.	0.00	24.48	48.97	97.93	195.86
Agriet.	0.00	179.33	358.65	717.31	1434.61

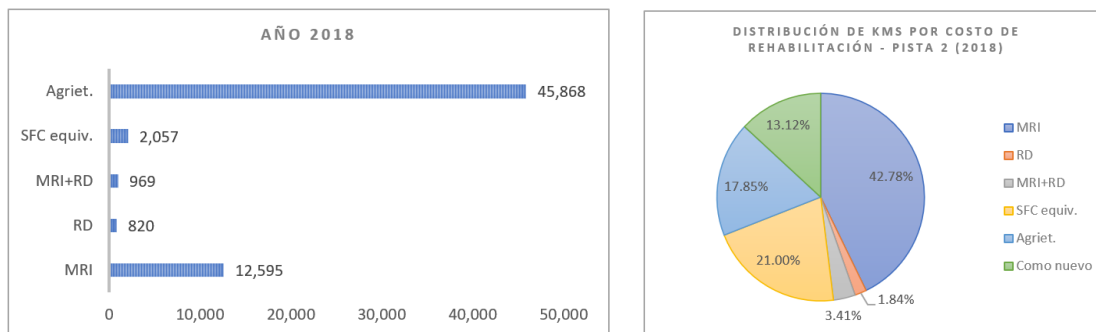
Dadas las actividades de rehabilitación, consecuentemente se tiene que los mayores porcentajes de pérdida se deben al indicador de agrietamiento. Otro aspecto que destacar es la equivalencia en costo que tiene, por ejemplo, una sección con agrietamiento en nivel “Malo” y alrededor de 10 secciones con MRI en nivel “Bueno”.



**Figura 3.6.1:** Porcentaje de pérdida según nivel de desempeño de indicador técnico.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.6.2 se presenta como ejemplo la pista 2 (2018), donde alrededor de un 43% de los kilómetros evaluados tienen costo asociado al MRI y cerca de un 18% se relacionan con el Agriet. El costo total por Agriet. es casi cuatro veces el costo por MRI. Si bien estos valores no se deben solo a secciones en niveles Malo y Muy Malo, son aquellas las que disminuyen considerablemente el valor del activo.



**Figura 3.6.2:** Distribución del costo de rehabilitación y kilómetros por indicador técnico - Pista 2 (2018).

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior recalca la importancia de mantener el estado del pavimento en condiciones adecuadas no solo desde el punto de vista del nivel de servicio que se está entregando a los usuarios, sino también desde la preservación del patrimonio vial.

# Capítulo 4

## Conclusiones y recomendaciones

Dada la tendencia mundial en la gestión de carreteras hacia un enfoque en objetivos estratégicos y las herramientas que requiere el Ministerio de Obras Públicas para su administración interna y para cumplir con sus compromisos internacionales, esta investigación se centró en el desarrollo de un método de valoración de pavimentos asfálticos.

Basado en los resultados presentados en cada capítulo de esta tesis, se puede concluir que el objetivo de desarrollar un método que pueda ser aplicado en bases de licitaciones viales fue logrado de forma parcialmente exitosa, ya que debe ser validado para su implementación.

A pesar de lo anterior, la hipótesis planteada es demostrada, puesto que la valorización del pavimento está íntimamente relacionada con el nivel de servicio que entrega el activo a los usuarios, que en conjunto con la inclusión de un indicador de capacidad estructural, otorgan una mayor precisión, exactitud y objetividad a los métodos actuales.

### 4.1. Conclusiones por objetivos

**Objetivo específico 1: Conceptualizar un método de valoración de pavimentos asfálticos que vincule el nivel de servicio a los usuarios con el valor del activo y que sea susceptible de implementación en carreteras interurbanas concesionadas.**

- Se identifican y clasifican distintos métodos de valoración según el tipo de valor considerado, que es la forma más común de clasificación. Los métodos se dividen en métodos basados en el costo, métodos basados en el beneficio y métodos basados en el valor de mercado. De acuerdo con el contexto del estudio, los métodos basados en el costo se consideran más apropiados, ya que valorizan aspectos que son atribuibles a la gestión del concesionario.
- A partir de un análisis comparativo entre los distintos métodos, se define como más adecuado para valorizar los pavimentos asfálticos el método de valor neto residual basado en costos históricos, adaptación a los objetivos de estudio realizada de manera exitosa. Al ser el pavimento un activo de alto valor con respecto al total de una carretera, este método permite una valorización más

precisa y objetiva al basarse en indicadores técnicos apropiados que describen la condición de este. La aplicación directa y sencilla de indicadores de nivel de servicio desarrollados para carreteras interurbanas concesionadas, la opción de evaluar la gestión del operador privado durante la etapa de explotación de una vía, la reducción de brechas tecnológicas y de información, y la flexibilidad para su implementación en contratos de concesión, son algunos de los motivos para su elección.

- Se identifican los conceptos básicos y requerimientos necesarios para realizar la valoración del activo, de manera tal que tanto el costo histórico como el costo de rehabilitación son calculados a través de los precios unitarios presentados en las bases de licitación respectivas; en consecuencia, se puede definir el valor inicial del activo y el cálculo de las pérdidas de valor al momento de la licitación. De esta forma, el método desarrollado considera los mismos precios de la cubicación y presupuesto con que se licita el proyecto, permitiendo evaluar la eficiencia del concesionario y no los cambios en el mercado que puedan beneficiar o perjudicar el valor del activo. Esta característica reduce las incertidumbres y variabilidades que presentan las metodologías actuales, gestionando de mejor manera el riesgo del proyecto.

**Objetivo específico 2: Incluir adicionalmente en el método de valorización, indicadores de capacidad estructural que no son percibibles por el usuario.**

- Se consideró para el desarrollo del método las características relevantes del pavimento, las cuales se evalúan a través de indicadores técnicos objetivos y medibles a lo largo del tiempo, representando adecuadamente la condición del activo. Se incluyeron de manera exitosa indicadores desarrollados para un modelo de Nivel de Servicio que se relacionan con la comodidad o seguridad de los usuarios que transitan por vías de alto estándar. Estos corresponden a: Mean Roughness Index (MRI), Rut Depth (RD), Overall A-weighted Sound Intensity Level (OASI), SFC equiv., y el Porcentaje de Agrietamiento. Cada uno de estos tiene umbrales de servicio para 5 niveles de desempeño, los cuales son considerados para la valoración de manera tal, que el valor del activo se relacione con la serviciabilidad que debe entregar.
- A cada indicador técnico se le designó una actividad de rehabilitación que lleve efectivamente al pavimento a su condición prístina cuando este alcance el umbral del nivel de desempeño “Malo”. Esta actividad es cuantificada monetariamente y corresponde al costo de rehabilitación en la valoración. Las actividades fueron escogidas dada su factibilidad de ejecución en proyectos interurbanos concesionados, por tanto, pueden ser utilizadas en el método de valoración. Las acciones de conservación no condicionan la conservación que decida ejecutar el concesionario.
- Se definieron porcentajes de pérdida de valor asociados a cada nivel de desempeño de los indicadores con el objetivo de establecer puntos intermedios de valor del activo. Esto se realizó a partir de principios sobre el desempeño típico de pavimentos, métodos de valorización estudiados, y la relación entre los umbrales de desempeño de los indicadores.
- Se realiza una propuesta de valoración de la capacidad estructural mediante el número estructural efectivo ( $NE_{efectivo}$ ) proveniente de los ensayos de deflectometría de impacto, que es un indicador

comúnmente utilizado para evaluar esta característica del pavimento, y permite definir una actividad de rehabilitación que restaure la capacidad inicial del activo. Sin embargo, por la restricción de ejecutar la actividad sin alterar la rasante de un proyecto, se subestima esta recuperación estructural, puesto que no es posible definir una actividad más exacta sin tener que realizar extracciones de testigos y ensayos de laboratorio.

- Una metodología de cálculo para determinar una actividad de valoración estructural más exacta en función del número estructural efectivo es desarrollada, pero tiene un grado de incertidumbre mayor a la formulación anterior. El cálculo depende del porcentaje de agrietamiento del pavimento, pero la falta de información para respaldar los datos con los que se elabora la propuesta no permite su validación.
- Con respecto a indicadores de deflexiones del pavimento ( $D_0$ , BLI, MLI y LLI) que fueron desarrollados para un modelo de conservación patrimonial, solo se realiza una propuesta preliminar de valoración, ya que no existe a nivel nacional el respaldo para definir actividades de rehabilitación a partir de estos parámetros. Lo anterior se debe a que el estudio sobre las deflexiones del pavimento indica que no basta con utilizar un único indicador para caracterizar la capacidad estructural, sino que deben integrarse entre ellos y con indicadores superficiales, para lograr una descripción completa de la condición y nivel de servicio que entrega el activo.

### **Objetivo específico 3: Sensibilizar el método utilizando datos reales de carreteras interurbanas concesionadas en etapa de explotación.**

- Se dispone de información del desempeño de 5 indicadores técnicos para 5 años de la etapa de explotación de una ruta nacional, lo que permite simular el método de valoración de forma exitosa, a pesar de no contar con información del indicador de nivel de ruido de rodadura (Overall A-weighted Sound Intensity Level) por ser un indicador sin información histórica.
- Con la información de deflectometría de impacto se logra sensibilizar las propuestas de valoración de capacidad estructural, de manera tal que se cuantifica la diferencia entre los costos de rehabilitación obtenidos a partir de cada una. Los resultados indican que el costo de rehabilitación por pérdida de capacidad estructural considerando una metodología más exacta, es alrededor de 5 veces mayor. Si se comparan los resultados aplicando el método de valoración incluyendo los demás indicadores técnicos, los costos de rehabilitación totales son en promedio el doble al utilizar la metodología más exacta. Los factores anteriores podrían ser diferentes en otras carreteras, siendo necesario contar con información de otras rutas nacionales para poder acotar estos valores y así tener un método de valoración que sea preciso y exacto al mismo tiempo.
- La aplicación del método a datos reales permite obtener la relación entre el nivel de servicio entregado a los usuarios y el valor del activo, de manera tal que una disminución en el desempeño de los indicadores técnicos se traduce en una disminución del valor del pavimento.
- Con la sensibilización se cuantifica la evolución temporal de los parámetros de valorización (costos y porcentajes de pérdida), analizando y comparando los resultados anualmente. Se observa que el

nivel de desempeño de los indicadores tiende a disminuir con el paso del tiempo, especialmente en las pistas lentas, lo que tiene como consecuencia directa el aumento de los costos de rehabilitación para cada año.

- Se comprueba la importancia de validar las propuestas para la valoración de capacidad estructural, ya que existe una diferencia entre los resultados de las pistas rápidas (sin información de indicador de deflectometría) y lentas (con información de indicador de deflectometría). Esta diferencia se puede deber tanto a las características de diseño y/o construcción, o por el uso y mantenimiento que reciben cada una de estas.
- Por último, se justifican las razones de elección del método de valor neto residual, en particular, sobre la reducción de brechas técnicas, tecnológicas y de información para su implementación. El método desarrollado puede incluirse fácilmente en bases de licitación viales, ya que además de su baja complejidad de cálculo, los datos necesarios para su implementación son parte de los requerimientos que debe cumplir el concesionario durante la etapa de explotación.

## 4.2. Comentarios generales

Con la revisión bibliográfica del estado del arte y de la práctica en cuanto a métodos de valoración para activos viales, se identifica que distintos grupos de investigadores han trabajado en el desarrollo de nuevos enfoques que tratan de suplir las limitaciones de los métodos tradicionales y adecuarse a los objetivos que puedan tener las agencias viales, sin embargo, los métodos de depreciación siguen siendo los más utilizados en distintos países en la actualidad. En base a esto, es importante que además de desarrollar nuevas metodologías, se comparen en lo posible, con datos reales de carreteras para evaluar los efectos tanto a nivel económico como conceptual.

Con respecto a lo anterior, es necesario recalcar lo fundamental de contar con información para poder realizar el cálculo de valor patrimonial, tanto de datos de inventarios viales, indicadores de desempeño que evalúen la condición de los activos e información sobre costos de construcción y de rehabilitación.

Por otra parte, al momento de desarrollar una metodología para valorizar la capacidad estructural a partir de datos de una ruta nacional, no se cuenta con las actividades de rehabilitación que fueron ejecutadas en la vía de estudio, de modo que no es posible validar las propuestas. En base a esto, se hace imprescindible contar con esta variable al momento de validar algún método propuesto.

Otro aspecto importante sobre el uso de indicadores a partir de la deflectometría de impacto, en particular del número estructural efectivo, es la puntualidad de los datos frente a los demás indicadores que se obtienen con ensayos continuos. Representar la capacidad estructural del pavimento requiere necesariamente de aplicar un método de segmentación estructural. Frente a la diversidad de métodos de tramificación que existen, se estudian y desarrollan tres opciones que se pueden aplicar de forma sencilla en bases de licitación, y que con la ayuda de herramientas estadísticas representan con un alto grado de confiabilidad la condición del pavimento.

### 4.3. Investigaciones futuras

En base a los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere para futuros trabajos de investigación:

- Realizar un análisis de sensibilización de los parámetros de valoración (costo de rehabilitación, porcentaje de pérdida de valor, etc.) variando los porcentajes de pérdidas de los distintos niveles de desempeño (Sección 2.2.2).
- Validar las propuestas de valoración para la capacidad estructural del pavimento con datos de otras rutas nacionales, ya sea concesionadas o que tengan tránsitos similares a estas. La validación también debe incluir la elección de un método de segmentación estructural para el cálculo del indicador.
- Estudiar la incorporación de los indicadores de deflexiones del pavimento ( $D_0$ , BLI, MLI y LLI) o de otros parámetros que representen de forma adecuada la capacidad estructural del pavimento, considerando todas las incertidumbres asociadas al ensaye de deflectometría de impacto.
- Integrar el método de valoración presentado con métodos de otros activos, de modo tal de tener una metodología general de valorización del Patrimonio Vial Concesionado (MVP) que pueda ser implementada en futuras bases de licitación. Para esto, se recomienda que los métodos tengan el mismo marco de tiempo para la valoración, de manera tal que la suma del valor de todos los activos tenga consistencia e interpretación.
- Establecer propuestas para incentivos y/o penalizaciones a partir de los resultados de la metodología de valorización del Patrimonio, con el objeto de entregar una herramienta de gestión completa para concesiones viales. Estas propuestas se pueden establecer a partir del valor total de la infraestructura o definiendo distintos incentivos y/o penalizaciones en base a alguna clasificación de los activos, por ejemplo, según el tipo de activo o la importancia para usuarios y comunidades, entre otras.

# Referencias

- AASHTO. (1993). “*AASHTO guide for design of pavement structures*”. America Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO. (2008). “*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice*”. American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington D.C.
- Almonte, L. (1999). “*Valorización del Patrimonio Vial*”. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Alyami, Z., & Tighe, S. (2016). “*A Methodology for Integrating Asset Valuation in Transportation Asset Management*”. Resilient Infrastructure, Canadian Society for Civil Engineering (CSCE) Proc.
- Amekudzi, A., Herabat, P., Wang, S., & Lancaster, C. (2002). “*Multipurpose asset valuation for civil infrastructure: Aligning valuation approaches with asset management objectives and stakeholder interests*”. Transportation research record, 1812(1), 211-218.
- Amekudzi-Kennedy, A., Amoaning-Yankson, S., Smith-Colin, J., Clark, R. J., and Bui, B.H. (2018). “*Performance-Based Research Implementation Management*”. Presented at 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Austroads. (2009). “*Guide to asset management. Part 1: Introduction to Asset Management*”. Sydney: AustRoads Incorporated.
- Austroads. (2016). “*Defining asset management level of service requirements for freight on rural arterial roads, AP-T306-16*”. Austroads, Sydney, NSW.
- Austroads. (2018). “*Guide to Asset Management - Technical Information Part 15: Technical Supplements*”. Sydney: AustRoads Incorporated.
- Beltrán, G. (2012). “*Evaluación estructural de pavimentos flexibles con métodos de inteligencia artificial y auscultación no destructiva*”. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Beltrán, G., Romo, P. (2014). “*Evaluación de pavimentos y decisiones de conservación con base en sistemas de inferencia difusos*”. Ingeniería, investigación y tecnología, 15(3), 391-402.

- Burgos, S. (2019). “*Indicadores de desempeño para capacidad estructural y vibraciones del pavimento y serviciabilidad de paraderos, para modelo de niveles de servicio en carreteras concesionadas*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Caimey, P. (2016). “*Levels of Service for Non-Freight Road Users*”. Austroads Publication N° AP-T316-16, Austroads Ltd. Australia.
- Contraloría General de la República de Chile (CGR). (2015). “*Normativa del Sistema de Contabilidad General de la Nación NICSP – CGR Chile*”. Resolución N°16 de 2015.
- CICCIP. (2005). “*Libro Verde de Indicadores de Calidad de Servicio de Carreteras*”. Comisión de Transportes del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- Contreras, R. A. (2015). “*Deflectometría*”. Dirección de Vialidad, Laboratorio Nacional, Subdepartamento de Auscultaciones y Prospecciones. Chile.
- Cowe Falls, L. (2004). “*Analysis of asset valuation methods for civil infrastructure*”. Ph. D Thesis., University of Waterloo, Ontario, Canada.
- de Solminihaç, H., Echaveguren, T., y Chamorro, A. (2018) “*Gestión de infraestructura vial*”. Tercera Edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Delgadillo, R., Echaveguren, T., Wahr, C., Muñoz, R., Gómez, J. and Jiménez, G. (2018). “*Estado del Arte y de la Práctica en Evaluación de Carreteras por Nivel de Servicio*”. 13th Chilean Maintenance Conference (PROVIAL). 6 – 10 August, Arica, Chile.
- Delgadillo, R., Echaveguren, T., Wahr, C., Muñoz, R., Gómez, J., Jiménez, G. y Ebensperger, M. (2020). “*Manual Técnico para Licitación de Concesiones Viales por Nivel de Servicio*”. Informe final proyecto Fondef IT16I10008.
- Dojutrek, M. S., Makwana, P. A. and Labi, S. (2012). “*A Methodology for Highway Asset Valuation in Indiana*”. Publication FHWA/IN/JTRP-2012/31. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Fernández, S. (2002). “*Análisis de la Evolución del Valor del Patrimonio Vial, Aplicado a la V Región de Chile, para el período 1995-2001*”. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- FHWA. (2016). “*Incorporating asset valuation into transportation asset management financial plans*”. No. FHWA-HIF-16-009.
- Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL). (2006). “*Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces*”. FEHRL REPORT 2006/02.

- Gómez, J. (2020). “*Desarrollo de herramientas de gestión para evaluar el desempeño en la operación y conservación del patrimonio durante la etapa de explotación de la concesión vial, aplicables en bases de licitación para futuras concesiones*” (MSc Thesis). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Groce, R., Mihai, F., Appleby, P., Bishop, M., Eckerth, K., Leong, L., Rafcliffe, D. and Shepherd, P. (2002). “*Integrated Asset Management Guidelines for Road Networks*”. Austroads Publication N° APR202/02. Austroads Inc. Australia.
- Hoffman, M.S. (2003). “*A direct method for evaluating the structural needs of flexible pavements based of FWD deflections*”. YONA, Engineering Consulting & Management Ltd., Haifa, Israel.
- Hogg, E. & Reid, D. (2017). “*Road asset management planning: Asset valuation report 2015-2016 (Informe n°3)*”. Falkirk Council, Scotland.
- Howard, R.J. (2011). “*Infrastructure Asset Management Under Australian Accounting Standards 27 (AAS27)*”. Proceedings of the ICE – Municipal Engineer, 145(4), 305 – 310.
- Kavussi, A., Abbasghorbani, M., Moghadas Nejad, F., & Bamdad Ziksari, A. (2017). “*A new method to determine maintenance and repair activities at network-level pavement management using falling weight deflectometer*”. Journal of Civil Engineering and Management, 23(3), 338-346.
- LoBEG. (2012). “*LoBEG Technical Note: Asset Valuation for Highway Structures*”. London Bridges Engineering Group.
- Lukanen, E.O., & Han, C. (1992). “*Pavement performance prediction models*”. Minnesota: Department of Transportation. Publisher: Braun Intertec Pavement, 121 pp.
- Martin, T., Gleeson, B., Chau, P., Ai, U., Thoresen, T. and Marzouk, S. (2016). “*Defining asset management level of service requirements for freight on rural arterial roads*”. Austroads Publication N° AP-T306-16. Austroads Ltd. Australia.
- Ministerio de Desarrollo Social (MDS). (2017). Documento de trabajo: “*Configuración y parametrización del Modelo HDM-4 a las condiciones de Chile*”. Subsecretaría de Evaluación Social, Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (1996). Bases de licitación “*Concesión Ruta 57 Santiago - Colina - Los Andes*”. Dirección General de Obras Públicas. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2004). “*Análisis de sensibilidad de parámetros del modelo HDM-4 y actualización de metodología para la determinación del estado de caminos pavimentados*”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2010-a). Ley 20.410 “*Modifica la Ley de Concesiones de Obras Públicas y Otras Normas que Indica*”.

- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2010-b). “*Valor del Patrimonio Vial de la Red Vial Nacional – Año 2009*”. Departamento de Gestión Vial, Subdirección de Desarrollo, Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2015). “*Estudio básico: Metodología para la determinación del Patrimonio Vial*”. [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: [http://www.apsa.cl/wp-content/uploads/2018/03/metodologia\\_patrimonio\\_vial\\_chile.pdf](http://www.apsa.cl/wp-content/uploads/2018/03/metodologia_patrimonio_vial_chile.pdf). Departamento de Gestión Vial, Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2016-a). “*Concesiones de Obras Públicas: 20 años*”. Coordinación de Concesiones de Obras Públicas. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2016-b). “*Valor del Patrimonio Vial de la Red Vial Nacional - Año 2013*”. Departamento de Gestión Vial, Subdirección de Desarrollo, Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2018). Bases de licitación “*Concesión mejoramiento ruta G-21*”. Dirección General de Concesiones. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2019-a). Bases de licitación “*Concesión Ruta 5 Tramo Talca - Chillán*”. Dirección General de Concesiones. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2019-b). “*Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño. Sección 3.604 Diseño de pavimentos nuevos*”. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2019-c). “*Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño. Sección 3.605 Recarpeteos asfálticos sobre pavimentos asfálticos*”. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2019-d). “*Informe: Estimación del Valor Patrimonial de la concesión Talca Chillán*”. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-a). “*Dimensionamiento y Características Red Vial Nacional 2019*”. Subdirección de Desarrollo, Departamento de Gestión Vial, Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-b). “*Informe Proposiciones de Acciones de Mantenimiento (PAM) y estado de la calzada y bermas para caminos pavimentados de la Red Vial Nacional*”. Subdirección de Desarrollo, Departamento de Gestión Vial, Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-c). “*Manual de Carreteras. Volumen N°5 Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Sección 5.408 Mezclas asfálticas en caliente*”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-d). “*Manual de Carreteras. Volumen N°5 Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.

- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-e). “Manual de Carreteras. Volumen N°6 Seguridad Vial. Sección 6.303 Señalización de tránsito horizontal (demarcación)”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-f). “Manual de Carreteras. Volumen N°6 Seguridad Vial. Sección 6.400 Señalización de Tránsito para Trabajos en la Vía”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-g). “Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño. Sección 3.603 Criterios para el diseño de pavimentos”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-h). “Manual de Carreteras. Volumen N°8 Especificaciones y Métodos de muestreo, ensaye y control. Sección 8.502.6 Auscultaciones y prospecciones: método para calcular las propiedades elásticas de los pavimentos a partir de la deflectometría de impacto (FWD)”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020-i). “Manual de Carreteras. Volumen N°8 Especificaciones y Métodos de muestreo, ensaye y control. Sección 8.502.5 Auscultaciones y prospecciones: método para medir deflexiones mediante el deflectómetro de impacto (FWD)”. Dirección de Vialidad. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2021). Bases de licitación “Concesión Ruta 5 Tramo Chacao - Chonchi”. Dirección General de Concesiones. Chile.
- Muñoz, G. (2002). Trabajo de investigación N°11: “Introducción a la tecnología de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente”. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Muñoz, R. (2020). “Desarrollo de un modelo para evaluar el nivel de servicio de carreteras interurbanas concesionadas desde el punto de vista del usuario” (MSc Thesis). Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.
- NCHRP. (2010). “NCHRP 20-74A - Development of Levels of Service for the Interstate Highway System”. National Cooperative Highway Research Program. Washington, DC, EUA: National Cooperative Highway Research Program.
- OECD. (1997). “Performance Indicators for the Road Sector”. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, Paris, Francia.
- Peters, D., & Zhang, Z. (2014). “Productivity-based Approach to Valuation of Transportation Infrastructure”. (No. SWUTC/14/600451-00089-1). Center for Transportation Research University of Texas at Austin.
- Rodríguez, M. (2020). “La variabilidad del precio en el contrato de construcción”. Revista de derecho (Valdivia), 33(2), 79-99.

- Rohde, G.T. (1994). “*Determining pavement structural number from FWD testing*”. In: Transportation Research Record 1448. TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 61-68.
- Russel, K. and Sharp, K. (2009). “*Guide to Asset Management. Part 7: Road – Related Asset Performance*”. Austroads Publication N° AGAM07/09. Austroads Inc. Australia.
- Saaty, T. L. (1990). *How to make a decision: the analytic hierarchy process*. European journal of operational research, 48(1), 9-26.
- Sanabria-Sandino, J., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015). “*Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica Años 2014-2015*”. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Schliessler, A., Bull, A. (1994). “*Camino, Un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales*” CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la ONU) y la GTZ (Agencia de Cooperación Técnica Alemana).
- Scott, C., Philip, I., Hamish, C. and Sean, M. (2011). “*Road asset management systems*”. 8th International Conference on Managing Pavement Assets (ICMPA8). Santiago, Chile, November 2011.
- Stone, C. D. (2014). “*A Methodological Framework for Economic Evaluation of Existing Roadway Assets*”. MS thesis. University of Texas at Austin, USA.
- Universidad de Concepción (UdeC). (2019-a). “*Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la resistencia al deslizamiento en la capa de rodadura*”. Informe técnico PL-CA-IT6.
- Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). (2019-a). “*Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la regularidad longitudinal del pavimento*”. Informe técnico PL-CA-IT1.
- Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). (2019-b). “*Definición de indicadores técnicos para la evaluación de pavimentos*”. Informe técnico PL-CA-IT2.
- Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). (2019-c). “*Definición de un indicador de nivel de servicio asociado al ruido de rodadura*”. Informe técnico PL-CA-IT4.
- Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). (2019-d). “*Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la Capacidad Estructural*”. Informe técnico PL-CA-IT09.
- Vargas-Tejeda, S., de Solminihac, H. y Echaveguren, T. (2008). “*Proposal of a segmentation procedure for skid resistance data*”. Arabian Journal of Science and Engineering, 33(1B), 89-104.
- Weldemicael, E., Li, S. X., & Redd, L. (2018). “*Asset Valuation of Transportation Infrastructure: Proof of Concept in Colorado*”. Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, Estados Unidos.

# Apéndices

## **Apéndice A**

### **Indicadores técnicos del modelo de nivel de servicio**

## A.1. Mean Roughness Index (MRI)

En la Figura A.1.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la regularidad longitudinal en pavimentos.

TIPO DE DOCUMENTO	Ficha técnica	
CARACTERÍSTICA	Regularidad longitudinal del Pavimento	
IDENTIFICADOR	PL-CA-FT1	
INFORME TÉCNICO ASOCIADO	Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la regularidad longitudinal del pavimento (PL-CA-IT1)	
DESARROLLADO POR	Universidad Técnica Federico Santa María	
INDICADOR	UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA
Mean Roughness Index (MRI)	m/km	Anual
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
ASTM E950 / E950M - 09(2018) Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer-Established Inertial Profiling Reference.		
ASTM E1170 - 97(2017) Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces.		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Perfilómetro Inercial (Clase 1, según ASTM E950)		
<b>METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES</b>		
La metodología de medición del perfil longitudinal se debe basar en la normativa ASTM E950. Esta medición se debe realizar en todas las pistas del área de concesión exceptuando las vías de servicio.		
Se deben medir 2 perfiles longitudinales por pista, cada uno a 0.7 m de distancia de las líneas que demarcan la pista (2.1 m de separación entre los transductores de distancia en el caso de una pista de 3.5 m).		
Los datos obtenidos cada perfil longitudinal deben ser guardados en un archivo de formato compatible con el software ProVal, para permitir realizar análisis posteriores de los resultados obtenidos, por ejemplo usando otros intervalos de evaluación.		
Respecto del equipo de medición, debe ser un perfilómetro inercial, que cumpla los requisitos necesarios para calificar como Clase 1 (según ASTM E950), tanto para el intervalo de muestreo longitudinal como de resolución vertical. Adicionalmente, debe poseer una certificación anual (Clase 1) de precisión y exactitud según ASTM E950. Para tales efectos, se debe contar con un valor de referencia aceptado en cada punto del perfil del pavimento, el que se debe derivar de un método de referencia como el de mira y nivel según ASTM 1364, o bien el uso de equipos tipo pivote como el Dipstick utilizando métodos de ensayo referenciales como AASHTO R41 o ASTM E2133.		
Posteriormente, se debe calcular el IRI de cada perfil longitudinal, basado en la normativa ASTM E1170. Para tal efecto, se debe utilizar el modelo de simulación de cuarto de vehículo. El valor final a reportar debe ser el IRI promedio de ambos perfiles (MRI), en unidades de m/km con un decimal.		
Las definiciones de singularidades debe ser aprobada por el inspector fiscal.		
Se calcula el valor de MRI individual (cada 50 m) y el valor de MRI promedio cada (1 km).		

**Figura A.1.1:** Ficha técnica para evaluar la regularidad longitudinal del pavimento.

Fuente: UTFSM (2019-a).

El protocolo de calificación del indicador se evalúa en secciones de 50 m y de 1 km, como se presenta en la Figura A.1.2:

PROTOCOLO DE CALIFICACIÓN				
Cada 50 m se tiene un nivel de desempeño según se define en (I).				
Cada 1 km se tiene un nivel de desempeño según se define en (II).				
NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
(I) MRI individual (cada 50 m) [m/km]				
[0.0 , 1.5]	[1.5 , 2.5]	[2.5 , 3.5]	[3.5 , 5.0]	≥ 5.0
(II) MRI promedio (cada 1 km) [m/km]				
[0.0 , 1.0]	[1.0 , 2.0]	[2.0 , 3.0]	[3.0 , 4.5]	≥ 4.5

**Figura A.1.2:** Protocolo de calificación por sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-a).

El protocolo de calificación global del indicador se presenta en la Figura A.1.3:

		MRI puntual (50 m)				
		Porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI puntual				
		[0.0 , 1.5]	[1.5 , 2.5]	[2.5 , 3.5]	[3.5 , 5.0]	≥ 5.0
Calificación del indicador	Muy Bueno	≥ 50%	< 50%	≤ 3.0%	≤ 0.5%	= 0%
	Bueno	≥ 50%		< 50%	≤ 0.5%	= 0%
	Justo	100%			≤ 0.5%	= 0%
	Malo	-			[0.5, 2.0]	= 0%
	Muy malo	100%				

		MRI promedio (1 km)				
		Porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI promedio				
		[0.0 , 1.0]	[1.0 , 2.0]	[2.0 , 3.0]	[3.0 , 4.5]	≥ 4.5
Calificación del indicador	Muy Bueno	≥ 50%	< 50%	≤ 1.0%	= 0%	= 0%
	Bueno	≥ 50%		< 50%	= 0%	= 0%
	Justo	100%			= 0%	= 0%
	Malo	-			[0.0, 5.0]	= 0%
	Muy malo	100%				

\* La calificación que ingresa al modelo de N.S. es la peor de las anteriores (entre MRI promedio e MRI puntual).

**Figura A.1.3:** Protocolo de calificación global del indicador.

Fuente: UTFSM (2019-a).

## A.2. Rut Depth (RD)

En la Figura A.2.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la regularidad transversal en pavimentos.

TIPO DE DOCUMENTO	Ficha técnica	
CARACTERÍSTICA	Regularidad transversal en pavimento flexible	
IDENTIFICADOR	PL-CA-FT2	
INFORME TÉCNICO ASOCIADO	Definición de indicadores técnicos para la evaluación de pavimentos (PL-CA-IT2)	
DESARROLLADO POR	Universidad Técnica Federico Santa María	
INDICADOR	UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA
Rut Depth (RD)	mm	Anual
NORMATIVA DE REFERENCIA		
AASHTO PP 69 - Determining Pavement Deformation Parameters and Cross Slope from Collected Transverse Profiles.		
AASHTO PP 70 - Collecting the Transverse Pavement Profile.		
ASTM E-1656 Standard Guide for Classification of Automated Pavement Condition Survey Equipment. Pavement Condition Survey Equipment		
AGAM-T014-16 Validation of a Laser Profilometer for Measuring Pavement Rutting (Reference Device Method).		
EQUIPO DE MEDICIÓN		
Perfilómetro T1111 (Según ASTM E-1656) y que cumpla los requisitos de medición del perfil transversal de AASHTO PP70 y las modificaciones planteadas en la presente ficha.		
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES		
La metodología de medición del perfil transversal se debe basar en AASHTO PP70, modificando el espaciamiento longitudinal máximo entre perfiles transversales a un máximo de 0.25 m y el intervalo de resumen a 50 m.		
La medición descrita, se debe realizar en todas las pistas del área de concesión exceptuando las vías de servicio.		
El cálculo de Rut Depth (RD) para cada huella se debe basar en AASHTO PP69.		
El equipo de medición debe ser validado siguiendo el protocolo que establece AGAM-T014-16.		
El valor de RD cada 50 m se calcula como el mayor valor entre RD promedio de la huella izquierda y RD promedio de la huella derecha.		

**Figura A.2.1:** Ficha técnica para evaluar la regularidad transversal del pavimento.

Fuente: UTFSM (2019-b).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.2.2:

PROTOCOLO DE CALIFICACIÓN				
Cada sección de 50 m tiene un nivel de desempeño según se define en (I). La calificación global se obtiene según se define en (II).				
(I) Calificación para cada sección de 50 m en base a Rut Depth de dicha sección (en mm)				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
[0.0 , 4.0]	[4.0 , 7.0]	[7.0 , 10.0]	[10.0 , 15.0]	> 15.0

**Figura A.2.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-b).

El protocolo de calificación global del indicador se presenta en la Figura A.2.3:

(II) Calificación global del indicador en base al porcentaje de secciones en cada rango de Rut Depth						
Rangos de Rut Depth en mm.						
		[0.0 , 4.0]	[4.0 , 7.0]	[7.0 , 10.0]	[10.0 , 15.0]	> 15.0
Calificación global del indicador	Muy Bueno	≥ 50%	≤ 50%	≤ 3.0%	≤ 0.5%	≤ 0.1%
	Bueno	≥ 50%		< 50%	≤ 0.5%	≤ 0.1%
	Justo	≤ 100%			≤ 0.5%	≤ 0.1%
	Malo	≤ 100%			[0.5, 2.0]	[0.1, 1.0]
	Muy malo	100%				

**Figura A.2.3:** Protocolo de calificación global del indicador.

Fuente: UTFSM (2019-b).

### A.3. Overall Sound Intensity Level (OASI)

En la Figura A.3.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar el nivel de ruido de rodadura.

<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	Ficha técnica	
<b>CARACTERÍSTICA</b>	Nivel de Ruido de Rodadura	
<b>IDENTIFICADOR</b>	PL-CA-FT4	
<b>INFORME TÉCNICO ASOCIADO</b>	Definición de un indicador de nivel de servicio asociado al ruido de rodadura (PL-CA-IT4)	
<b>DESARROLLADO POR</b>	Universidad Técnica Federico Santa María	
<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDIDA</b>
Overall A-weighted Sound Intensity Level	dBA	Anual
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
AASHTO T360-16 Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method.		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Sistema de medición OBSI, según AASHTO T360-16.		
<b>METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES</b>		
La metodología de medición del Nivel de Ruido de Rodadura se debe basar en la normativa AASHTO T360.		
Las mediciones deben ser realizadas a una velocidad de $95 \pm 1,5$ [km/h]. Si esta velocidad no es permitida en el tramo, el ensayo debe ser realizado a la más alta que se pueda alcanzar de las siguientes velocidades: 70, 55 y 40 [km/h].		
En cada una de las pistas se debe determinar el Nivel General de Intensidad de Sonido en escala de ponderación A (Overall A-weighted Sound Intensity Level) medido y normalizado según la normativa AASHTO T360.		
El valor final a reportar debe ser el Nivel General de Intensidad de Sonido en escala de ponderación A (Overall A-weighted Sound Intensity Level) normalizado de cada pista.		
El valor de Nivel General de Intensidad de Sonido en escala de ponderación A se debe determinar en tramos de 200 [m], donde se considerará el valor máximo entre las pistas como Nivel General de Intensidad de Sonido en escala de ponderación A del tramo.		
La medición descrita, se debe realizar en toda el área de concesión (exceptuando las vías de servicio), pero en el caso de puentes y túneles sus resultados solo tienen que ser reportados, pero no serán evaluados dentro del Modelo de Nivel de Servicio.		
Si el ensayo es realizado a velocidades inferiores a 93,5 [km/h], no será considerado en la evaluación por Nivel de Servicio. Aún así, los resultados del ensayo deben ser reportados.		

**Figura A.3.1:** Ficha técnica para evaluar el nivel de ruido de rodadura.

Fuente: UTFSM (2019-c).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (200 m) se presenta en la Figura A.3.2:

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
RANGO DE INDICADOR [dBA]				
≤ 100	]100, 102]	]102, 104]	]104,106]	> 106

**Figura A.3.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-c).

El protocolo de calificación global del indicador se presenta en la Figura A.3.3:

		Overall A-Weighted Sound Intensity				
		Porcentaje de secciones dentro de cada rango de OAWSI [dBA]				
Calificación del indicador		< 100	[100, 102]	[102, 104]	[104,106]	> 106
		Muy Bueno	≥ 50%	< 50%	= 0%	= 0%
Bueno	≥ 45%		< 55%	= 0%	= 0%	
Justo	100%			= 0%	= 0%	
Malo	-			[0.0, 10.0]	= 0%	
Muy malo	-			[10.0, 15.0]	= 0%	
		-			> 0%	

**Figura A.3.3:** *Protocolo de calificación global del indicador.*

Fuente: UTFSM (2019-c).

### A.4. SFC equivalente

En la Figura A.4.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la resistencia al deslizamiento en pavimentos.

TIPO DE DOCUMENTO	Ficha técnica		
CARACTERÍSTICA	Resistencia al deslizamiento de la Capa de Rodadura		
IDENTIFICADOR	PL-CA-FT6		
INFORME TÉCNICO ASOCIADO	Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la resistencia al deslizamiento en la capa de rodadura (PL-CA-IT6)		
DESARROLLADO POR	Universidad de Concepción		
INDICADOR	UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA	
SFC equivalente	-	Anual	
<b>NORMATIVAS DE REFERENCIA</b>			
Medición de fricción con Grip Tester, Numeral 8.502.18 del Manual de Carreteras Volumen 8, Edición 2018.			
Medición de fricción con Scrim Numeral, 8.502.17 del Manual de Carreteras Volumen 8, Edición 2018.			
ASTM E2340M-15 Runway Friction Tester.			
<b>EQUIPOS DE MEDICIÓN</b>			
Grip Tester (Norma 8.502.18); SCRIM (Norma 8.502.17); Runway Friction Tester (ASTM E2340.M-15)			
<b>METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES</b>			
Los procedimientos de medición se realizarán de acuerdo a las normas 8.502.17 y 8.502.18. Previamente se deberá verificar la repetibilidad y reproducibilidad de la flota de equipos mediante el estándar 8.502.20 del Manual de Carreteras Volumen 6, Edición 2018. En el caso en que la medición se desarrolle con un equipo distinto del equipo SCRIM, se deberán aplicar los coeficientes de homologación mediante el procedimiento descrito en el estándar 8.503.19 del Manual de Carreteras Volumen 6, Edición 2018. Las mediciones se procesan para una longitud de muestreo de 50 m.			
La ITO deberá verificar si los valores de fricción obtenidos se encuentran sobre los umbrales de alerta o intervención, según sea el caso, de acuerdo a lo especificado en las tablas 6.203.303(1) y 6.203.303.B del Volumen 6 del Manual de Carreteras, Edición 2018.			
La medición descrita, se debe realizar en todas las pistas del área de concesión exceptuando las vías de servicio.			

**Figura A.4.1:** Ficha técnica para evaluar la resistencia al deslizamiento del pavimento.

Fuente: UdeC (2019-a).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.4.2:

PROTOCOLO DE CALIFICACIÓN				
Cada sección se define como 50 m de pista , y tiene un nivel de desempeño según se define en (I). La calificación global se obtiene según se define en (II).				
(I) Calificación para cada sección de 50 m en base a SFC equivalente de dicha sección				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
[0.65 , 1.00]	[0.55 , 0.65]	[0.40 , 0.55]	[0.20 , 0.40]	[0.00 , 0.20]

**Figura A.4.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UdeC (2019-a).

El protocolo de calificación global del indicador se presenta en la Figura A.4.3:

(II) Calificación global del indicador en base al porcentaje de secciones en cada rango de SFC equivalente						
		Rangos de SFC equivalente				
		[0.65, 1.00]	[0.55, 0.65]	[0.40, 0.55]	[0.20, 0.40]	[0.00, 0.20]
Calificación global del indicador	Muy Bueno	≥ 50 %	≤ 50 %	≤ 5 %	= 0.0%	= 0.0%
	Bueno	≥ 50 %		< 50 %	= 0.0%	= 0.0%
	Justo	100%			= 0.0%	= 0.0%
	Malo	≤ 100 %			[0.0, 5.0]	= 0.0%
	Muy malo	100%				

**Figura A.4.3:** Protocolo de calificación global del indicador.

Fuente: UdeC (2019-a).

## A.5. Porcentaje de agrietamiento

En la Figura A.5.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar el porcentaje de agrietamiento en pavimentos.

<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	Ficha técnica	
<b>CARACTERÍSTICA</b>	Arietamientos en pavimentos flexibles/rígidos	
<b>IDENTIFICADOR</b>	PL-CA-FT8	
<b>INFORME TÉCNICO ASOCIADO</b>	Definición de un indicadores técnicos para la evaluación de pavimentos (PL-CA-IT2)	
<b>DESARROLLADO POR</b>	Universidad Técnica Federico Santa María	
<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDIDA</b>
Porcentaje de agrietamiento (pav. flexible)	[%]	Anual
Porcentaje de losas agrietadas (pav. rígido)	[%]	Anual
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
AASHTO PP 67 Quantifying Cracks in Asphalt Pavement Surfaces from Collected Pavement Images Utilizing Automated Methods.		
AASHTO PP 68 Collecting Images of Pavement Surfaces for Distress Detection.		
ASTM E-1656 Standard Guide for Classification of Automated Pavement Condition Survey Equipment. Pavement Condition Survey Equipment.		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Equipo de medición de grietas C2221 o superior (según ASTM E-1656)		
<b>METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES</b>		
Se deben inspeccionar todas las pistas.		
Se deben recolectar imágenes del pavimento según se establece en AASHTO PP 68		
Se deben reportar las grietas por tipo (pattern, transverse, longitudinal), severidad y zona según se define en AASHTO PP 67. Para efectos de evaluar el desempeño se consideran como grietas aquellas que no poseen sello íntegro y bien adherido, sin embargo de igual forma se deben reportar las grietas selladas.		
La longitud de la sección de resumen debe ser 50 m. Tanto para pavimento flexibles como de hormigón.		
Para determinar los niveles de desempeño se deben sumar los valores de agrietamiento por tipo (pattern, transverse, longitudinal) en la sección de resumen y contrastarlos con lo establecido en (I) en el caso de los pavimentos flexibles, las grietas transversales y longitudinales se transforman a un equivalente de área al multiplicar su longitud por 0.5 m.		
Se considera que una losa está agrietada si presenta al menos una grieta longitudinal, transversal o de esquina según la sección Deterioros en Pavimentos Rígidos del Catálogo de Deterioros Anexo al MC-V7. Los niveles de desempeño se establecen según (II) en el caso de los pavimentos rígidos.		
La escala de desempeño es distinta para cada tipo de pavimento, pero como en ambos casos se mide en unidades espaciales de 50 metros, se utiliza la tabla adjunta para evaluar el comportamiento a nivel de carretera, considerando la totalidad de secciones analizadas.		

**Figura A.5.1:** Ficha técnica para evaluar el porcentaje de agrietamiento en pavimentos.

Fuente: UTFSM (2019-b).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.5.2:

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
(I) Agrietamiento pavimento flexible [%]				
[0.0 , 4.0]	[4.0 , 7.0]	[7.0 , 10.0]	[10.0 , 15.0]	> 15.0
(II) Losas de hormigón agrietadas [%]				
[0.0 , 5.0]	[5.0 , 10]	[10 , 15]	[15 , 20]	> 20.0

**Figura A.5.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-b).

El protocolo de calificación global del indicador se presenta en la Figura A.5.3:

		Porcentaje de secciones dentro de cada rango de agrietamiento				
		MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Calificación del indicador	Muy Bueno	≥ 50	< 50	≤ 0.5	0	0
	Bueno	≥ 50	< 50	≤ 0.5	0	0
	Justo	100%			≤ 0.5	≤ 0.1
	Malo	-			]0.5, 2.0]	= 0
	Muy malo	100%				

**Figura A.5.3:** *Protocolo de calificación global del indicador.*

*Fuente: UTFSM (2019-b).*

## A.6. Deflexión máxima ( $D_0$ )

En la Figura A.6.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la capacidad estructural general en pavimentos.

<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	Ficha técnica	
<b>CARACTERÍSTICA</b>	Capacidad Estructural General	
<b>IDENTIFICADOR</b>	PL-CA-FT9	
<b>INFORME TÉCNICO ASOCIADO</b>	Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la capacidad estructural (PL-CA-IT9)	
<b>DESARROLLADO POR</b>	Universidad Técnica Federico Santa María	
<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDIDA</b>
Deflexión máxima ( $D_0$ )	[ $\mu\text{m}$ ]	Cada 3 años
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
8.502.5 Manual de Carreteras Volumen N°8		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Deflectómetro de Impacto (FWD)		
<b>MÉTODO DE MEDIDA</b>		
$D_0$ = Deflexión en el centro de carga. Se medirán los valores puntuales de las deflexiones en el centro de la carga aplicada, se informarán en $\mu\text{m}$ . Los ensayos deben realizarse según una secuencia fija alternando posición y desfasando las mediciones entre una y otra pista, al menos cada 50 m (por pista) y sobre la huella más transitada. Quedan exentas de este análisis secciones de viaductos, pasos superiores y puentes que estén contenidos en la carretera. Se considerarán para valores puntuales las deflexiones corregidas por humedad, temperatura y carga, según indique la normativa o recomendaciones vigentes.		

**Figura A.6.1:** Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural general  $D_0$  en pavimentos.

Fuente: UTFSM (2019-d).

El protocolo de calificación, en carreteras con más de 20 millones de EE de diseño, para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.6.2:

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Rangos indicador $D_0$ [ $\mu\text{m}$ ]				
Pavimento Base Granular				
$\leq 200$	]200;300]	]300;400]	]400;500]	>500
Pavimento Base Cementada				
$\leq 125$	]125;150]	]150;200]	]200;250]	>250
Pavimento Base Bituminosa				
$\leq 200$	]200;300]	]300;400]	]400;500]	>500

**Figura A.6.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-d).

El protocolo de calificación, en carreteras con entre 10 y 20 millones de EE de diseño, para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.6.3:

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Rangos indicador D <sub>0</sub> [µm]				
Pavimento Base Granular				
≤375	]375;450]	]450;500]	]500;600]	>600
Pavimento Base Cementada				
≤200	]225;250]	]225;250]	]250;450]	>450
Pavimento Base Bituminosa				
≤375	]375;450]	]450;500]	]500;600]	>600

**Figura A.6.3:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-d).

El protocolo de calificación global del indicador se presenta en la Figura A.6.4:

		Porcentaje del total de mediciones puntuales de D <sub>0</sub> dentro de cada rango				
		Muy Bueno	Bueno	Justo	Malo	Muy Malo
Calificación del indicador	Muy Bueno	≥ 50%	< 50%	< 1%	= 0%	= 0%
	Bueno	≥ 50%		< 50%	= 0%	= 0%
	Justo	-			≤5%	≤2%
	Malo	-			≤10%	≤2%
	Muy Malo	-			>10%	≤2%
		-			>2%	

**Figura A.6.4:** Protocolo de calificación global del indicador.

Fuente: UTFSM (2019-d).

## A.7. Índice de capa base (BLI)

En la Figura A.7.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la capacidad estructural de la capa base en pavimentos.

<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	<b>Ficha técnica</b>	
<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>Capacidad Estructural Capa Base</b>	
<b>IDENTIFICADOR</b>	<b>PL-CA-FT10</b>	
<b>INFORME TÉCNICO ASOCIADO</b>	<b>Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la capacidad estructural (PL-CA-IT9)</b>	
<b>DESARROLLADO POR</b>	<b>Universidad Técnica Federico Santa María</b>	
<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDIDA</b>
Índice de Capa Base (BLI)	[ $\mu\text{m}$ ]	Cada 3 años
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
8.502.5 Manual de Carreteras Volumen N°8		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Deflectómetro de Impacto (FWD)		
<b>METODO DE MEDIDA</b>		
<p>BLI=D<sub>0</sub>-D<sub>300</sub></p> <p>Se medirán los valores puntuales de las deflexiones en el centro de la carga aplicada y a 300 [mm] de este, se informarán en <math>\mu\text{m}</math>.</p> <p>Los ensayos deben realizarse según una secuencia fija alternando posición y desfasando las mediciones entre una y otra pista, al menos cada 50 m (por pista) y sobre la huella mas transitada.</p> <p>Se considerarán para valores puntuales las deflexiones corregidas por humedad, temperatura y carga, según indique la normativa o recomendaciones vigentes.</p>		

**Figura A.7.1:** Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural de capa base en pavimentos.

Fuente: UTFSM (2019-d).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.7.2:

<b>NIVELES DE DESEMPEÑO</b>				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
<b>Rangos indicador BLI [<math>\mu\text{m}</math>]</b>				
<b>Pavimento Base Granular</b>				
≤50	]50;100]	]100;200]	]200;300]	>300
<b>Pavimento Base Cementada</b>				
≤25	]25;40]	]40;100]	]100;300]	>300
<b>Pavimento Base Bituminosa</b>				
≤50	]50;100]	]100;200]	]200;400]	>400

**Figura A.7.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-d).

## A.8. Índice de capa media (MLI)

En la Figura A.8.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la capacidad estructural de capas medias en pavimentos.

<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	<b>Ficha técnica</b>	
<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>Capacidad Estructural Capas Medias</b>	
<b>IDENTIFICADOR</b>	<b>PL-CA-FT11</b>	
<b>INFORME TÉCNICO ASOCIADO</b>	<b>Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la capacidad estructural (PL-CA-IT9)</b>	
<b>DESARROLLADO POR</b>	<b>Universidad Técnica Federico Santa María</b>	
<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDIDA</b>
Índice de Capa Media (MLI)	[ $\mu\text{m}$ ]	Cada 3 años
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
8.502.5 Manual de Carreteras Volumen N°8		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Deflectómetro de Impacto (FWD)		
<b>METODO DE MEDIDA</b>		
MLI=D <sub>300</sub> -D <sub>600</sub> Se medirán los valores puntuales de las deflexiones a 300 [mm] y 600 [mm] desde el centro de carga, se informarán en $\mu\text{m}$ . Los ensayos deben realizarse según una secuencia fija alternando posición y desfasando las mediciones entre una y otra pista, al menos cada 50 m (por pista) y sobre la huella mas transitada. Se considerarán para valores puntuales las deflexiones corregidas por humedad, temperatura y carga, según indique la normativa o recomendaciones vigentes.		

**Figura A.8.1:** Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural de capas medias en pavimentos.

Fuente: UTFSM (2019-d).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.8.2:

<b>NIVELES DE DESEMPEÑO</b>				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Rangos indicador D <sub>0</sub> [ $\mu\text{m}$ ]				
Pavimento Base Granular				
≤200	]200;300]	]300;400]	]400;500]	>500
Pavimento Base Cementada				
≤125	]125;150]	]150;200]	]200;250]	>250
Pavimento Base Bituminosa				
≤200	]200;300]	]300;400]	]400;500]	>500

**Figura A.8.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-d).

## A.9. Índice de capa inferior (LLI)

En la Figura A.9.1 se presenta la ficha técnica que permite evaluar la capacidad estructural de capas bajas y subrasante en pavimentos.

<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	Ficha técnica	
<b>CARACTERÍSTICA</b>	Capacidad Estructural Capas Bajas y Subrasante	
<b>IDENTIFICADOR</b>	PL-CA-FT12	
<b>INFORME TÉCNICO ASOCIADO</b>	Definición de un indicador de nivel de servicio asociado a la capacidad estructural (PL-CA-IT9)	
<b>DESARROLLADO POR</b>	Universidad Técnica Federico Santa María	
<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDIDA</b>
Índice de Capa Inferior (LLI)	[ $\mu\text{m}$ ]	Cada 3 años
<b>NORMATIVA DE REFERENCIA</b>		
8.502.5 Manual de Carreteras Volumen N°8		
<b>EQUIPO DE MEDICIÓN</b>		
Deflectómetro de Impacto (FWD)		
<b>METODO DE MEDIDA</b>		
$LLI = D_{600} - D_{900}$ Se medirán los valores puntuales de las deflexiones a 600 [mm] y 900 [mm] desde el centro de carga, se informarán en $\mu\text{m}$ . Los ensayos deben realizarse según una secuencia fija alternando posición y desfasando las mediciones entre una y otra pista, al menos cada 50 m (por pista) y sobre la huella mas transitada. Se considerarán para valores puntuales las deflexiones corregidas por humedad, temperatura y carga, según indique la normativa o recomendaciones vigentes.		

**Figura A.9.1:** Ficha técnica para evaluar la capacidad estructural de capas bajas y subrasante en pavimentos.

Fuente: UTFSM (2019-d).

El protocolo de calificación para evaluar cada sección (50 m) se presenta en la Figura A.9.2:

NIVELES DE DESEMPEÑO				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Rangos indicador LLI [ $\mu\text{m}$ ]				
Pavimento Base Granular				
$\leq 30$	]30;40]	]40;50]	]50;100]	>100
Pavimento Base Cementada				
$\leq 30$	]30;35]	]35;40]	]40;80]	>80
Pavimento Base Bituminosa				
$\leq 30$	]30;40]	]40;50]	]50;80]	>80

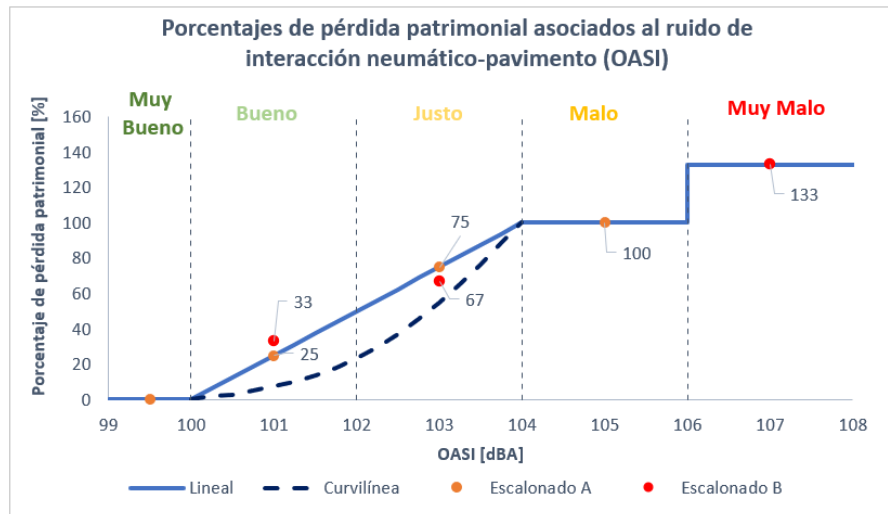
**Figura A.9.2:** Protocolo de calificación para cada sección de la carretera.

Fuente: UTFSM (2019-d).

## **Apéndice B**

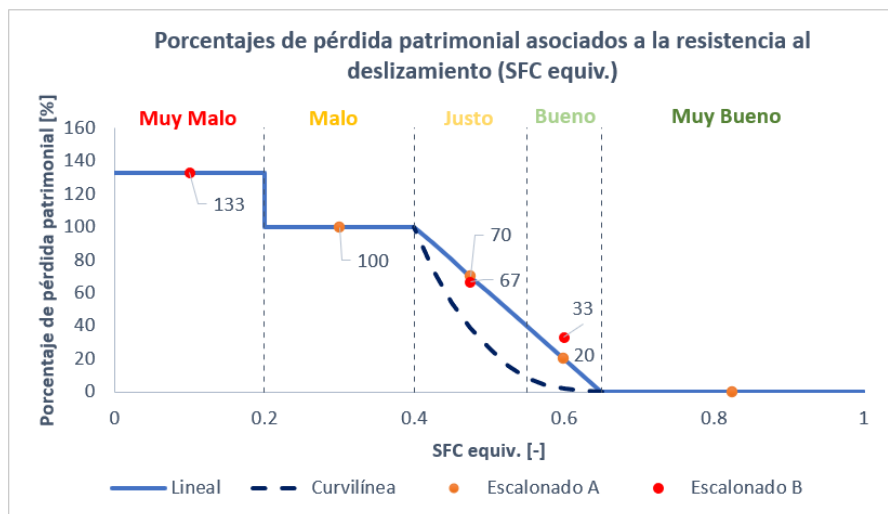
### **Gráficos y tablas de datos para cálculo del costo de rehabilitación**

## B.1. Curvas para la proyección del costo de rehabilitación



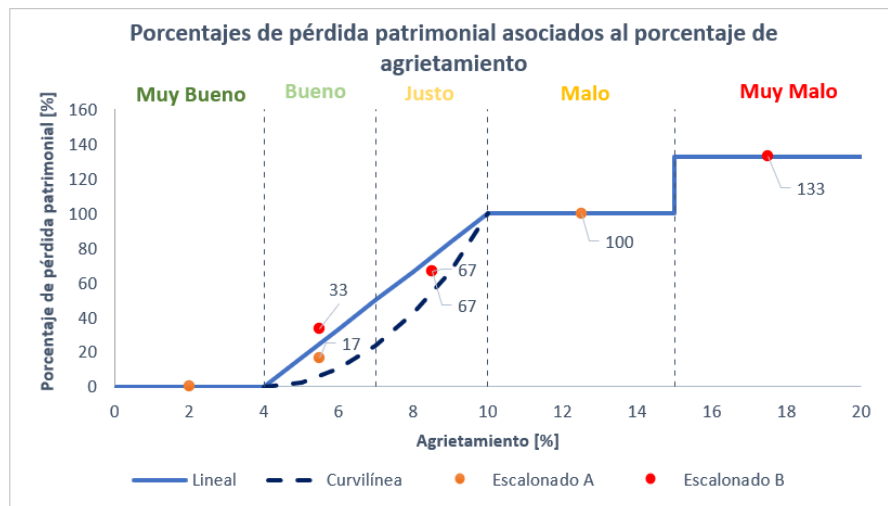
**Figura B.1.1:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador OASI.

Fuente: Elaboración propia.



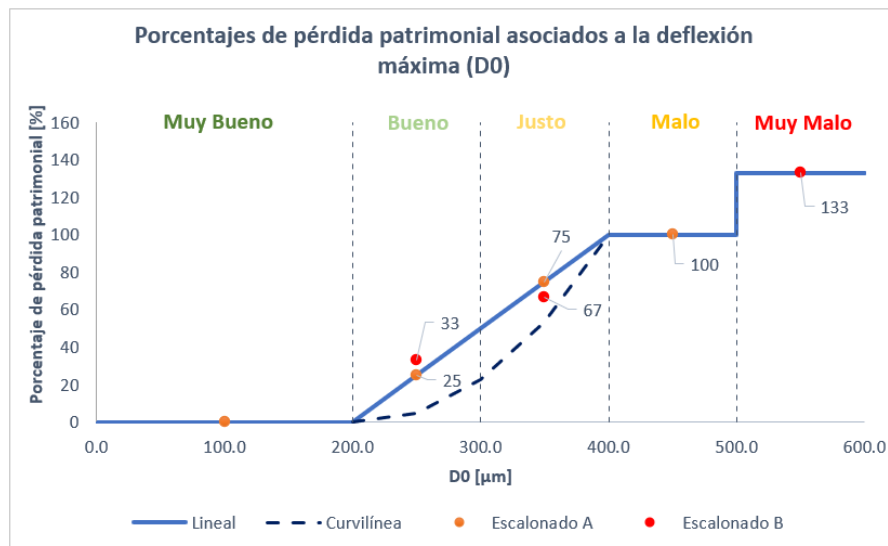
**Figura B.1.2:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador SFC equiv.

Fuente: Elaboración propia.



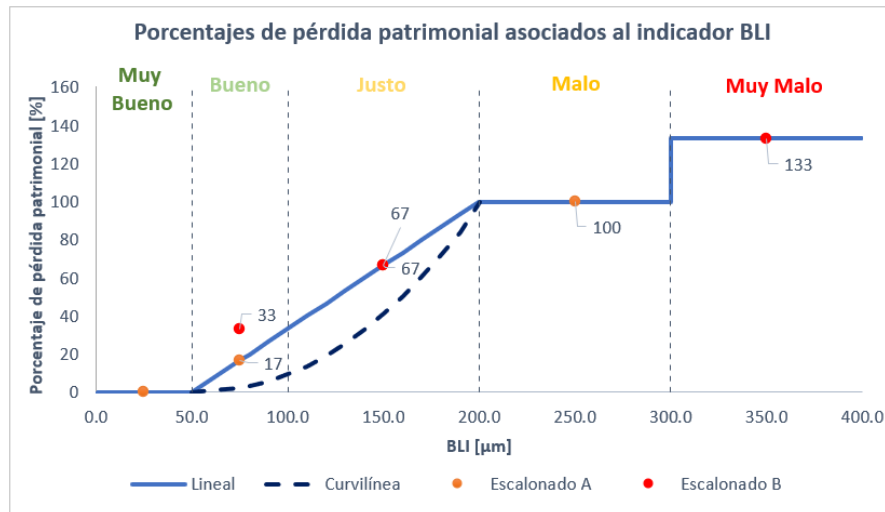
**Figura B.1.3:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador Porcentaje de agrietamiento.

Fuente: Elaboración propia.



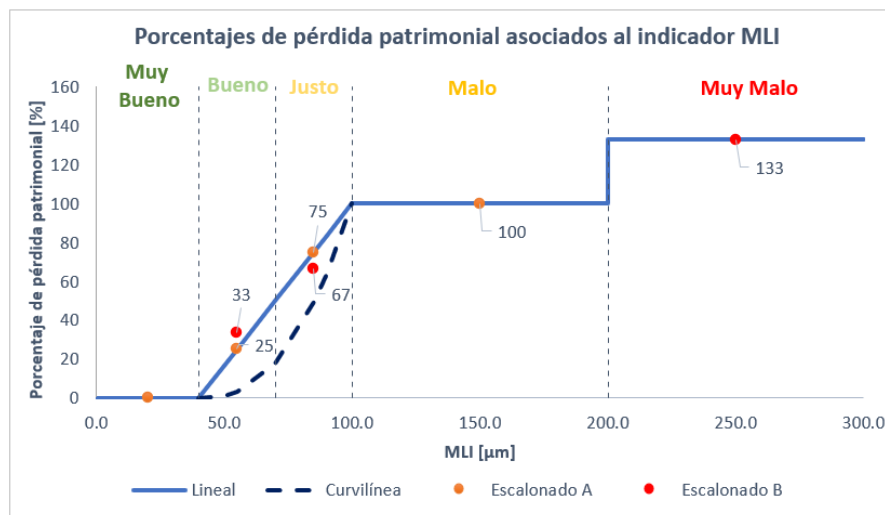
**Figura B.1.4:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador  $D_0$  (EE mayor a 20 millones y base granular).

Fuente: Elaboración propia.



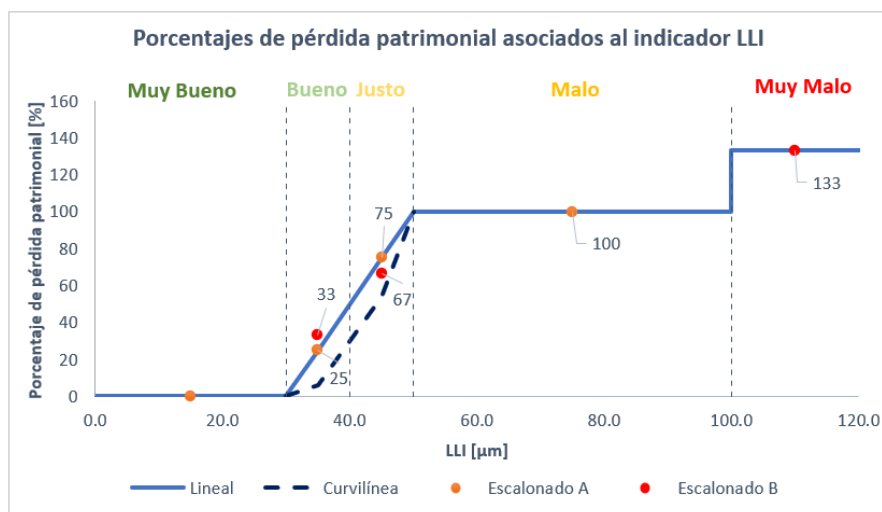
**Figura B.1.5:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador BLI (base granular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura B.1.6:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador MLI (base granular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura B.1.7:** Métodos para definir el porcentaje de pérdida en función del nivel de desempeño para el indicador LLI (base granular).

Fuente: Elaboración propia.

## B.2. Detalle de partidas para actividades de rehabilitación

Las partidas han sido itemizadas según Manual de Carreteras, Volumen 5 (MOP, 2020-d) y los precios unitarios deben ser definidos en el contrato de licitación correspondiente. Cabe destacar que, el precio unitario de las partidas involucra el suministro de todos los materiales, equipos y mano de obra necesarios, incluso su transporte y colocación, compactación, terminación y demás trabajos y actividades requeridos para cumplir con lo especificado en la correspondiente sección del Manual de Carreteras.

### a) Regularidad longitudinal y transversal del pavimento

Dado que los indicadores MRI y RD se reportan en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada en esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla B.2.1. El ancho de pista se define como “b”, en m.

**Tabla B.2.1:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador MRI y RD en pavimentos flexibles.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot 0.06 \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

**b) Nivel de ruido de rodadura**

Dado que el indicador de OASI se reporta en secciones de 200 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada en esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla B.2.2. El ancho de pista se define como “b”, en m.

**Tabla B.2.2:** *Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador OASI en pavimentos flexibles.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$200 \cdot b$
416-1	Microaglomerados Asfálticos Discontinuos en Caliente Tipo M (monogranulares)	$m^3$	$200 \cdot 0.035 \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$200 \cdot b$

**c) Resistencia al deslizamiento**

Dado que el indicador de SFC equiv. se reporta en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada en esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla B.2.3. El ancho de pista se define como “b”, en m.

**Tabla B.2.3:** *Partidas, bases de medición y cantidad de obra para cálculo del costo de rehabilitación de indicador SFC equiv. en pavimentos flexibles.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
416-1	Microaglomerados Asfálticos Discontinuos en Caliente Tipo M (monogranulares)	$m^3$	$50 \cdot 0.01 \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

**d) Agrietamiento**

Dado que el indicador de Agrietamiento se reporta en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada en esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla B.2.4. El ancho de pista, el espesor de carpeta de rodadura y el espesor de carpeta intermedia (binder) se definen como “b”, “ $h_{CR}$ ”, “ $h_{CI}$ ”, respectivamente. Todas las dimensiones se encuentran en m.

**Tabla B.2.4:** Partidas y bases de medición para actividad de rehabilitación de indicador Agrietamiento en pavimentos flexibles.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{CR} \cdot b$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	$50 \cdot h_{CI} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

Las partidas involucradas en el cálculo del costo de rehabilitación podrían cambiar en función de la estructura de pavimento evaluada. Por ejemplo, si un pavimento tiene dos tipos de capas asfálticas intermedias, deben incluirse en el cálculo del costo de rehabilitación.

### B.3. Comparación métodos de tramificación

**Tabla B.3.1:** Datos comparación métodos de tramificación - Tramo 4 diseño.

<b>PK Inicio</b>	<b>1km</b>	<b>4km</b>	<b>TH</b>	<b>DP</b>	<b>PK Inicio</b>	<b>1km</b>	<b>4km</b>	<b>TH</b>	<b>DP</b>
<b>17.90</b>	81.1%	84.7%	91.9%	67.6%	<b>25.10</b>	136.0%	142.3%	152.3%	117.1%
<b>18.10</b>	81.1%	84.7%	91.9%	78.4%	<b>25.30</b>	136.0%	142.3%	152.3%	178.4%
<b>18.30</b>	81.1%	84.7%	91.9%	76.6%	<b>25.50</b>	136.0%	142.3%	152.3%	86.5%
<b>18.50</b>	81.1%	84.7%	91.9%	84.7%	<b>25.70</b>	136.0%	142.3%	103.6%	102.7%
<b>18.70</b>	81.1%	84.7%	91.9%	91.0%	<b>25.90</b>	96.4%	103.6%	103.6%	109.0%
<b>18.90</b>	94.6%	84.7%	91.9%	82.0%	<b>26.10</b>	96.4%	103.6%	103.6%	99.1%
<b>19.10</b>	94.6%	84.7%	91.9%	84.7%	<b>26.30</b>	96.4%	103.6%	103.6%	99.1%
<b>19.30</b>	94.6%	84.7%	91.9%	88.3%	<b>26.90</b>	100.0%	103.6%	103.6%	100.0%
<b>19.50</b>	94.6%	84.7%	91.9%	181.1%	<b>28.10</b>	125.2%	103.6%	103.6%	92.8%
<b>19.70</b>	94.6%	84.7%	91.9%	61.3%	<b>28.30</b>	125.2%	103.6%	103.6%	105.4%
<b>19.90</b>	98.2%	84.7%	91.9%	145.0%	<b>28.50</b>	125.2%	103.6%	103.6%	109.9%
<b>20.10</b>	98.2%	84.7%	91.9%	127.9%	<b>28.70</b>	125.2%	103.6%	103.6%	197.3%
<b>20.30</b>	98.2%	84.7%	91.9%	132.4%	<b>28.90</b>	100.0%	103.6%	103.6%	119.8%
<b>20.70</b>	98.2%	84.7%	91.9%	73.9%	<b>29.10</b>	100.0%	103.6%	103.6%	66.7%
<b>20.90</b>	81.1%	84.7%	91.9%	82.9%	<b>29.30</b>	100.0%	103.6%	103.6%	102.7%
<b>21.10</b>	81.1%	84.7%	91.9%	84.7%	<b>29.50</b>	100.0%	103.6%	103.6%	88.3%
<b>21.30</b>	81.1%	84.7%	91.9%	53.2%	<b>29.70</b>	100.0%	103.6%	76.6%	105.4%
<b>21.50</b>	81.1%	84.7%	91.9%	97.3%	<b>30.30</b>	75.7%	76.6%	76.6%	91.9%
<b>21.70</b>	81.1%	84.7%	91.9%	113.5%	<b>30.50</b>	75.7%	76.6%	76.6%	60.4%
<b>22.10</b>	124.3%	142.3%	91.9%	89.2%	<b>30.70</b>	75.7%	76.6%	76.6%	65.8%
<b>22.30</b>	124.3%	142.3%	91.9%	179.3%	<b>30.90</b>	71.2%	76.6%	76.6%	69.4%
<b>22.50</b>	124.3%	142.3%	91.9%	80.2%	<b>31.10</b>	71.2%	76.6%	76.6%	68.5%
<b>22.70</b>	124.3%	142.3%	91.9%	188.3%	<b>31.30</b>	71.2%	76.6%	76.6%	79.3%
<b>22.90</b>	155.0%	142.3%	152.3%	191.9%	<b>31.50</b>	71.2%	76.6%	76.6%	75.7%
<b>23.10</b>	155.0%	142.3%	152.3%	95.5%	<b>31.70</b>	71.2%	76.6%	76.6%	65.8%
<b>23.30</b>	155.0%	142.3%	152.3%	152.3%	<b>31.90</b>	78.4%	76.6%	76.6%	72.1%
<b>23.50</b>	155.0%	142.3%	152.3%	171.2%	<b>32.30</b>	78.4%	76.6%	76.6%	82.0%
<b>23.70</b>	155.0%	142.3%	152.3%	172.1%	<b>32.50</b>	78.4%	76.6%	76.6%	82.0%
<b>23.90</b>	156.8%	142.3%	152.3%	184.7%	<b>32.70</b>	78.4%	76.6%	76.6%	78.4%
<b>24.30</b>	156.8%	142.3%	152.3%	191.0%	<b>32.90</b>	78.4%	76.6%	76.6%	80.2%
<b>24.50</b>	156.8%	142.3%	152.3%	193.7%	<b>33.30</b>	78.4%	76.6%	76.6%	86.5%
<b>24.70</b>	156.8%	142.3%	152.3%	100.0%	<b>33.50</b>	78.4%	76.6%	76.6%	87.4%
<b>24.90</b>	136.0%	142.3%	152.3%	99.1%	<b>33.70</b>	78.4%	76.6%	76.6%	79.3%

## B.4. Evolución ratio NEfectivo/NEdiseño

**Tabla B.4.1:** *Tramificación 1km.*

2016		2017		2019	
PK Inicio	ratio [ %]	PK Inicio	ratio [ %]	PK Inicio	ratio [ %]
17.90-18.70	91.7%	17.90-18.70	92.7%	17.90-18.70	104.1%
18.90-19.70	103.0%	18.90-19.70	108.2%	18.90-19.70	122.6%
19.90-20.70	92.7%	19.90-20.70	112.3%	19.90-20.70	124.7%
20.90-21.70	87.6%	20.90-21.70	92.7%	20.90-21.70	103.0%
22.10-22.70	131.9%	22.10-22.70	142.2%	22.10-22.70	139.1%
22.90-23.70	170.1%	22.90-23.70	177.3%	22.90-23.70	152.5%
23.90-24.70	184.5%	23.90-24.70	179.3%	23.90-24.70	168.0%
24.90-25.70	175.2%	24.90-25.70	155.6%	24.90-25.70	134.0%
25.90-26.70	122.6%	25.90-26.70	110.3%	25.90-26.70	84.5%
26.90-27.90	132.9%	26.90-27.90	114.4%	26.90-27.90	85.5%
27.90-28.70	121.6%	27.90-28.70	143.2%	27.90-28.70	119.5%
28.90-29.70	131.9%	28.90-29.70	114.4%	28.90-29.70	92.7%
29.90-30.70	105.1%	29.90-30.70	86.5%	30.30-30.70	93.8%
30.90-31.70	89.6%	30.90-31.70	81.4%	30.90-31.70	86.5%
31.90-32.70	90.7%	31.90-32.70	89.6%	31.90-32.70	97.9%
32.90-33.70	104.1%	32.90-33.70	89.6%	32.90-33.70	88.6%

**Tabla B.4.2:** *Tramificación 4km.*

2016		2017		2019	
PK Inicio	ratio [ %]	PK Inicio	ratio [ %]	PK Inicio	ratio [ %]
17.90-21.70	93.8%	17.90-21.70	96.9%	17.90-21.70	107.2%
22.10-25.70	164.9%	22.10-25.70	162.8%	22.10-25.70	148.4%
25.90-29.70	129.8%	25.90-29.70	118.5%	25.90-29.70	91.7%
30.30-33.70	96.9%	30.30-33.70	87.6%	30.30-33.70	89.6%

**Tabla B.4.3:** *Tramificación método diferencias acumuladas.*

2016		2017		2019	
PK Inicio	ratio [ %]	PK Inicio	ratio [ %]	PK Inicio	ratio [ %]
17.90-22.70	98.9%	17.90-22.70	105.1%	17.90-22.70	109.2%
22.90-25.50	178.3%	22.90-25.50	174.2%	22.90-25.50	155.6%
25.70-29.50	130.9%	25.70-29.50	118.5%	25.70-29.50	94.8%
29.70-33.70	98.9%	29.70-33.70	87.6%	29.70-33.70	90.7%

## **Apéndice C**

### **Datos y resultados caso de estudio**

## C.1. Evolución temporal de desempeño de pistas

### Pista 1

**Tabla C.1.1:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 1).

Nivel de desempeño	Rango de MRI [m/km]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 1.5[	50.8	41.1	50.6	36.9	34.6
Bueno	[1.5 , 2.5[	47.0	57.3	47.8	61.1	61.8
Justo	[2.5 , 3.5[	2.2	1.5	1.6	2.0	3.6
Malo	[3.5 , 5.0[	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy Malo	$\geq 5.0$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.2:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 1).

Nivel de desempeño	Rango de RD [mm]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	94.6	93.3	91.0	90.1	90.6
Bueno	[4.0 , 7.0[	4.9	6.7	8.8	9.7	8.9
Justo	[7.0 , 10.0]	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3
Malo	]10.0 , 15.0]	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.3:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCeq. (Pista 1).

Nivel de desempeño	Rango de SFC equiv. [-]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	]0.65 , 1.00]	95.1	89.2	94.1	62.1	88.5
Bueno	]0.55 , 0.65]	4.9	10.0	5.7	36.4	10.9
Justo	]0.40 , 0.55]	0.0	0.8	0.3	1.5	0.5
Malo	]0.20 , 0.40]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy Malo	[0.00 , 0.20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.4:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de %Agrt. (Pista 1).

Nivel de desempeño	Rango de Agrietamiento [%]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	100.0	100.0	100.0	99.2	98.0
Bueno	[4.0 , 7.0[	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3
Justo	[7.0 , 10.0[	0.0	0.0	0.0	0.5	1.3
Malo	[10.0 , 15.0]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3

**Pista 2****Tabla C.1.5:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 2).

Nivel de desempeño	Rango de MRI [m/km]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 1.5[	55.1	45.1	54.8	41.5	42.4
Bueno	[1.5 , 2.5[	43.8	53.3	44.1	55.4	55.0
Justo	[2.5 , 3.5[	1.1	1.6	1.1	3.1	2.6
Malo	[3.5 , 5.0[	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy Malo	≥ 5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.6:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 2).

Nivel de desempeño	Rango de RD [mm]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	87.0	95.0	92.6	92.9	92.6
Bueno	[4.0 , 7.0[	12.4	4.5	6.4	6.0	6.8
Justo	[7.0 , 10.0]	0.5	0.5	1.1	0.5	0.5
Malo	]10.0 , 15.0]	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.7:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCeq. (Pista 2).

Nivel de desempeño	Rango de SFC equiv. [-]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	]0.65 , 1.00]	79.5	70.2	81.9	40.2	74.2
Bueno	]0.55 , 0.65]	20.5	26.1	15.7	51.4	24.7
Justo	]0.40 , 0.55]	0.0	3.7	2.4	8.4	1.1
Malo	]0.20 , 0.40]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy Malo	]0.00 , 0.20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.8:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de % Agrt. (Pista 2).

Nivel de desempeño	Rango de Agrietamiento [%]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	100.0	100.0	99.7	82.2	94.5
Bueno	[4.0 , 7.0[	0.0	0.0	0.3	4.5	1.1
Justo	[7.0 , 10.0[	0.0	0.0	0.0	4.7	0.8
Malo	[10.0 , 15.0]	0.0	0.0	0.0	4.5	2.1
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	0.0	4.2	1.6

**Pista 3****Tabla C.1.9:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 3).

Nivel de desempeño	Rango de MRI [m/km]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 1.5[	41.1	29.6	35.0	22.2	19.3
Bueno	[1.5 , 2.5[	54.6	64.7	53.0	58.6	56.6
Justo	[2.5 , 3.5[	3.8	5.4	11.0	16.2	20.1
Malo	[3.5 , 5.0[	0.5	0.3	1.0	3.0	4.1
Muy Malo	≥ 5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.10:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 3).

Nivel de desempeño	Rango de RD [mm]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	88.1	85.8	76.2	78.5	73.0
Bueno	[4.0 , 7.0[	10.3	12.4	16.7	15.9	20.3
Justo	[7.0 , 10.0]	1.6	1.8	5.5	4.5	5.7
Malo	]10.0 , 15.0]	0.0	0.0	1.6	0.8	1.0
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0

**Tabla C.1.11:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCeq. (Pista 3).

Nivel de desempeño	Rango de SFC equiv. [-]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	]0.65 , 1.00]	100.0	43.3	58.2	53.5	56.6
Bueno	]0.55 , 0.65]	0.0	47.2	35.8	37.6	36.8
Justo	]0.40 , 0.55]	0.0	9.5	6.0	8.8	6.7
Malo	]0.20 , 0.40]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy Malo	[0.00 , 0.20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.12:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de %Agrt. (Pista 3).

Nivel de desempeño	Rango de Agrietamiento [%]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	100.0	100.0	94.8	92.4	85.1
Bueno	[4.0 , 7.0[	0.0	0.0	1.6	1.3	4.4
Justo	[7.0 , 10.0[	0.0	0.0	1.0	2.8	2.8
Malo	[10.0 , 15.0]	0.0	0.0	1.0	0.5	2.1
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	1.6	3.0	5.7

**Pista 4****Tabla C.1.13:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de MRI (Pista 4).

Nivel de desempeño	Rango de MRI [m/km]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 1.5[	27.6	20.6	16.6	11.0	6.7
Bueno	[1.5 , 2.5[	64.3	66.8	57.9	52.2	50.0
Justo	[2.5 , 3.5[	7.6	11.2	21.5	29.2	36.6
Malo	[3.5 , 5.0[	0.5	1.3	3.4	7.0	6.7
Muy Malo	≥ 5.0	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0

**Tabla C.1.14:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de RD (Pista 4).

Nivel de desempeño	Rango de RD [mm]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	71.4	76.2	66.2	62.9	68.7
Bueno	[4.0 , 7.0[	26.5	20.9	26.4	30.0	26.8
Justo	[7.0 , 10.0]	1.6	2.7	5.4	5.0	3.6
Malo	]10.0 , 15.0]	0.0	0.3	2.0	1.6	0.8
Muy Malo	> 15.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0

**Tabla C.1.15:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de SFCeq. (Pista 4).

Nivel de desempeño	Rango de SFC equiv. [-]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	]0.65 , 1.00]	90.3	20.9	39.0	45.2	43.3
Bueno	]0.55 , 0.65]	9.7	45.7	37.2	44.4	41.3
Justo	]0.40 , 0.55]	0.0	33.4	23.8	10.4	15.4
Malo	]0.20 , 0.40]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy Malo	[0.00 , 0.20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tabla C.1.16:** Evolución temporal del porcentaje de secciones dentro de cada rango de %Agrt. (Pista 4).

Nivel de desempeño	Rango de Agrietamiento [%]	Año				
		2015	2016	2017	2018	2019
Muy Bueno	[0.0 , 4.0[	100.0	98.7	90.3	82.2	81.8
Bueno	[4.0 , 7.0[	0.0	1.1	4.3	4.4	6.1
Justo	[7.0 , 10.0[	0.0	0.3	2.0	4.7	2.2
Malo	[10.0 , 15.0]	0.0	0.0	2.0	4.4	3.9
Muy Malo	> 15.0	0.0	0.0	1.4	4.2	5.9

## C.2. Tramificaciones

**Tabla C.2.1:** Tramificación por método: sectores de longitud constante - Pista 3 y 4.

Tramo de diseño	Cantidad sectores	Longitud por sector [km]
1	2	5.35
2	1	2.9
3	1	4.3
4	4	4.0
5	11	5.0

**Tabla C.2.2:** Tramificación por método de diferencias acumuladas - Pista 3.

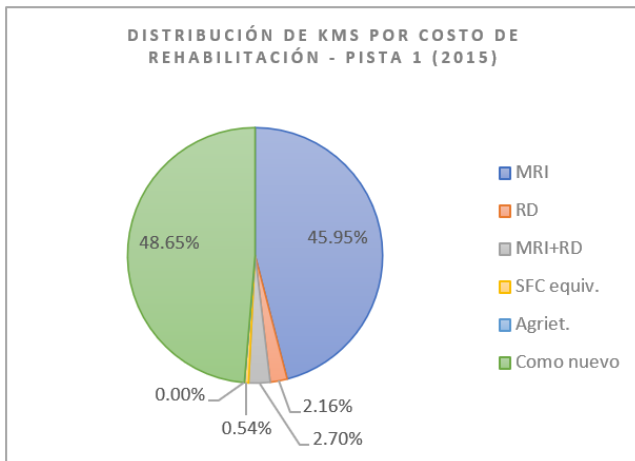
Tramo de diseño	Sector homogéneo	P.K. [km]	Longitud [km]	Tramo de diseño	Sector homogéneo	P.K. [km]	Longitud [km]
1	1	0.000-10.700	10.7	5	8	33.900-37.700	3.8
2	2	10.700-13.600	2.9		9	37.700-39.700	2
3	3	13.600-17.900	4.3		10	39.700-40.700	1
4	4	17.900-22.900	5		11	40.700-43.700	3
	5	22.900-25.700	2.8		12	43.700-49.000	5.3
	6	25.700-29.700	4		13	49.000-88.700	39.7
	7	29.700-33.900	4.2				

**Tabla C.2.3:** Tramificación por método de diferencias acumuladas - Pista 4.

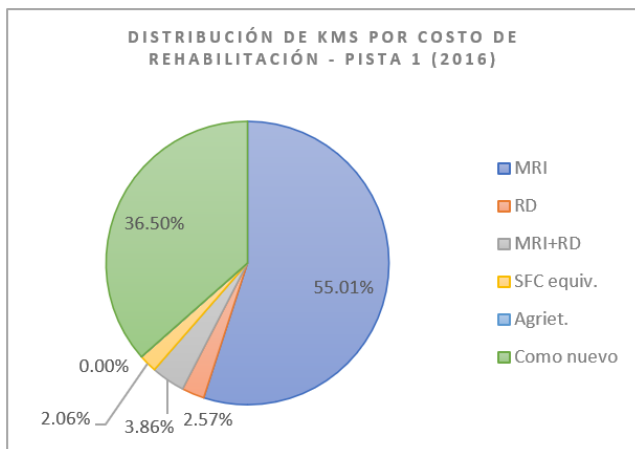
Tramo de diseño	Sector homogéneo	P.K. [km]	Longitud [km]	Tramo de diseño	Sector homogéneo	P.K. [km]	Longitud [km]
1	1	0.000-10.700	10.7	5	5	33.900-35.700	1.8
2	2	10.700-13.600	2.9		6	35.700-45.200	9.5
3	3	13.600-17.900	4.3		7	45.200-49.000	3.8
4	4	17.900-33.900	16		8	49.000-88.700	39.7

### C.3. Resultados complementarios por pistas

#### C.3.1. Pista 1



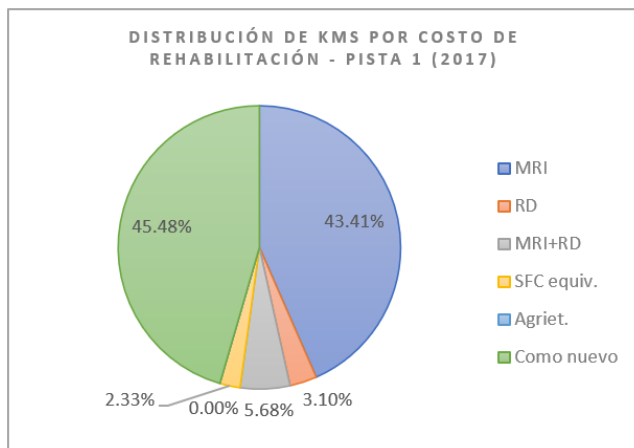
	Año 2015						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	85	4	5	1	0	90	185
Km	17.0	0.8	1.0	0.2	0.0	18.0	37.0



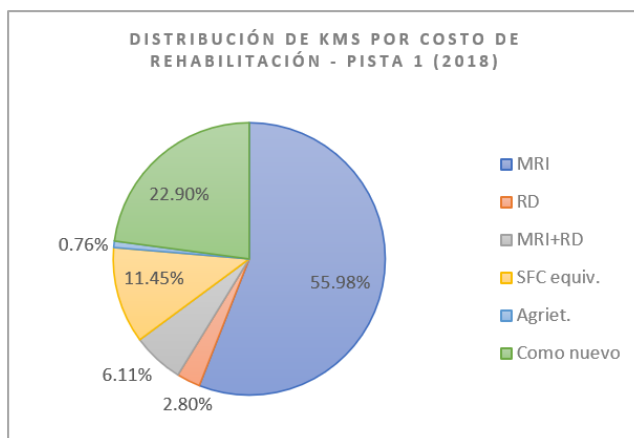
	Año 2016						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	214	10	15	8	0	142	389
Km	42.8	2.0	3.0	1.6	0.0	28.4	77.8

**Figura C.3.1:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 1.

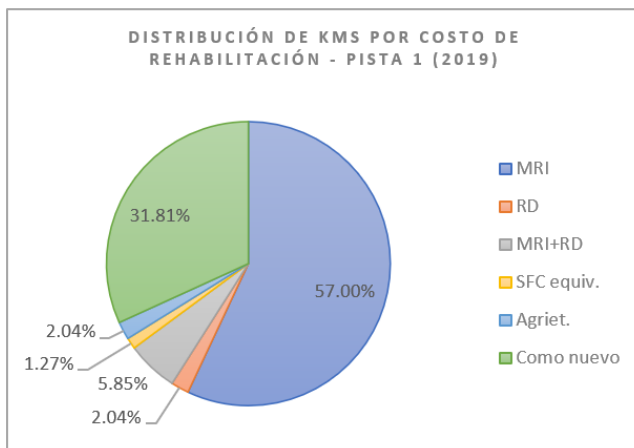
Fuente: Elaboración propia.



	Año 2017						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	168	12	22	9	0	176	387
Km	33.6	2.4	4.4	1.8	0.0	35.2	77.4



	Año 2018						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	220	11	24	45	3	90	393
Km	44.0	2.2	4.8	9.0	0.6	18.0	78.6

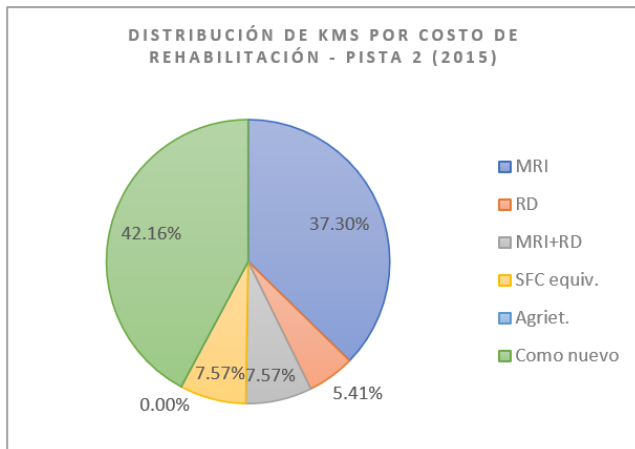


	Año 2019						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	224	8	23	5	8	125	393
Km	44.8	1.6	4.6	1.0	1.6	25.0	78.6

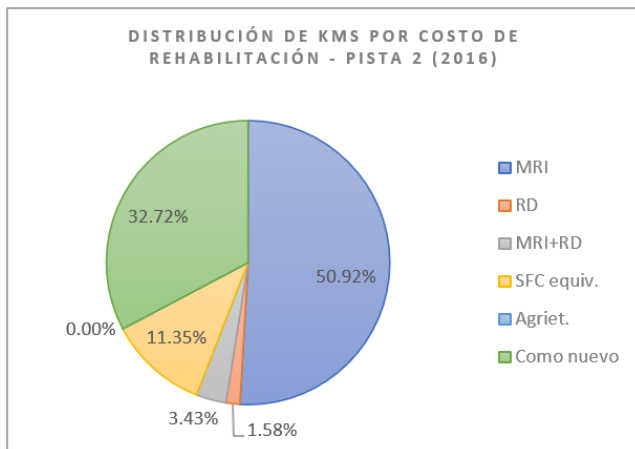
**Figura C.3.2:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 1 (continuación).

Fuente: Elaboración propia.

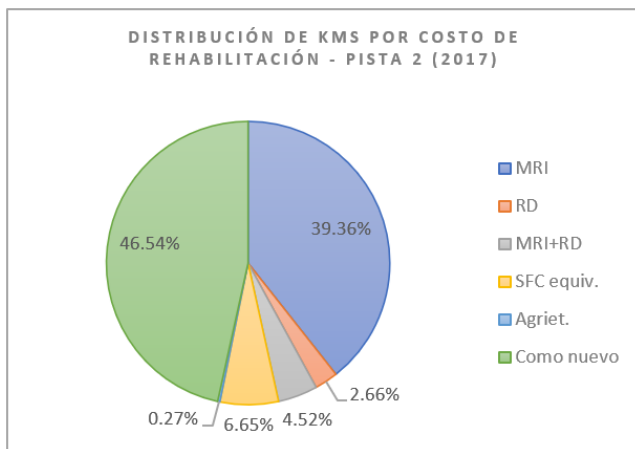
### C.3.2. Pista 2



	Año 2015						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	69	10	14	14	0	78	185
Km	13.8	2.0	2.8	2.8	0.0	15.6	37.0



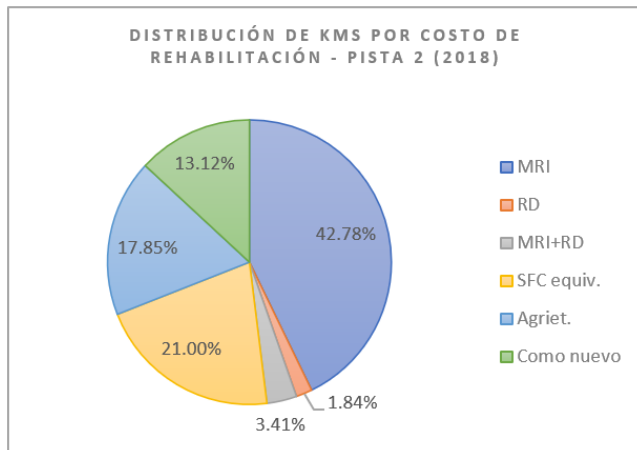
	Año 2016						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	193	6	13	43	0	124	379
Km	38.6	1.2	2.6	8.6	0.0	24.8	75.8



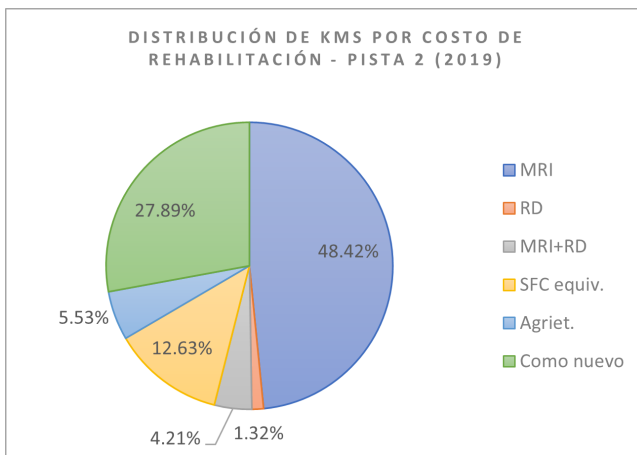
	Año 2017						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	148	10	17	25	1	175	376
Km	29.6	2.0	3.4	5.0	0.2	35.0	75.2

**Figura C.3.3:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 2.

Fuente: Elaboración propia.



	Año 2018						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	163	7	13	80	68	50	381
Km	32.6	1.4	2.6	16.0	13.6	10.0	76.2

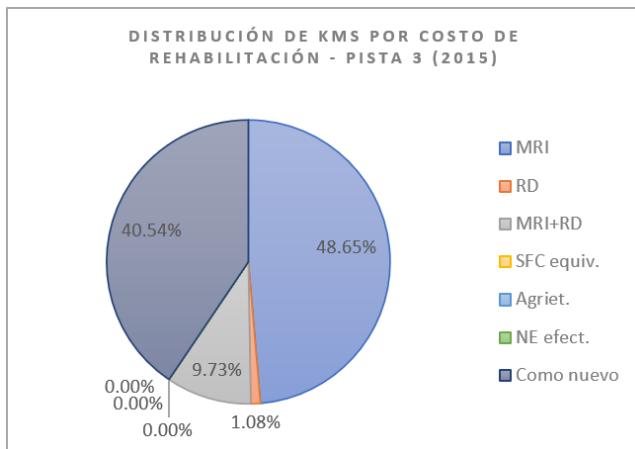


	Año 2019						Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	Como nuevo	
# Secciones	184	5	16	48	21	106	380
Km	36.8	1.0	3.2	9.6	4.2	21.2	76.0

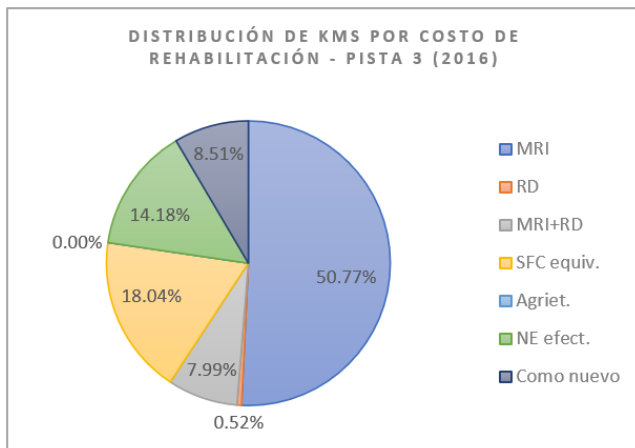
**Figura C.3.4:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 2 (continuación).

Fuente: Elaboración propia.

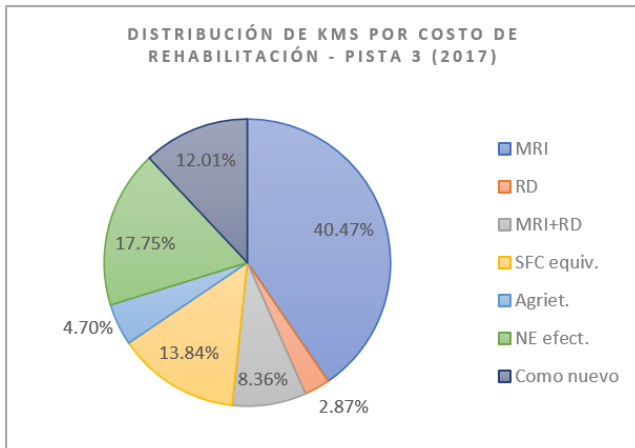
### C.3.3. Pista 3



	Año 2015							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	90	2	18	0	0	0	75	185
Km	18.0	0.4	3.6	0.0	0.0	0.0	15.0	37.0



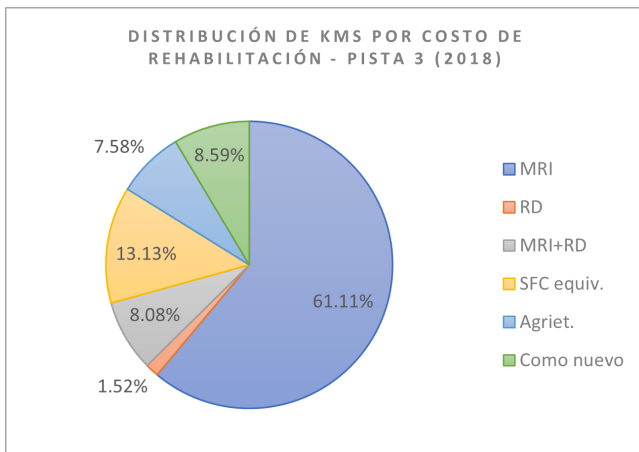
	Año 2016							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	197	2	31	70	0	55	33	388
Km	39.4	0.4	6.2	14.0	0.0	11.0	6.6	77.6



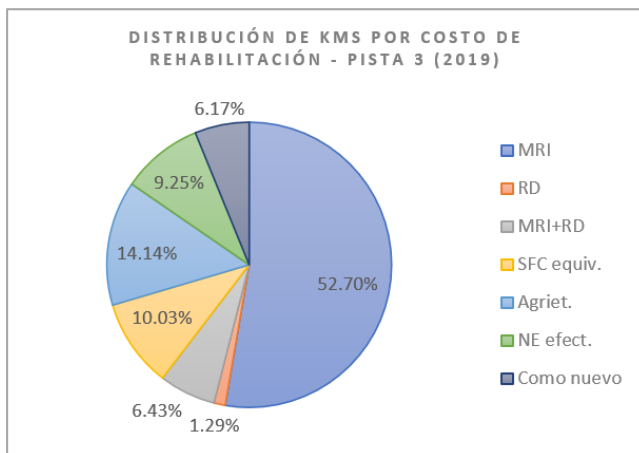
	Año 2017							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	155	11	32	53	18	68	46	383
Km	31.0	2.2	6.4	10.6	3.6	13.6	9.2	76.6

**Figura C.3.5:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 3 (Tramif: 1km).

Fuente: Elaboración propia.



	Año 2018							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	242	6	32	52	30	0	34	396
Km	48.4	1.2	6.4	10.4	6.0	0.0	6.8	79.2

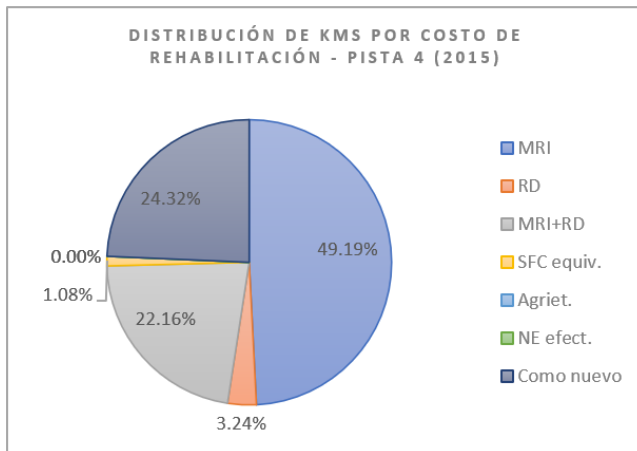


	Año 2019							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	205	5	25	39	55	36	24	389
Km	41.0	1.0	5.0	7.8	11.0	7.2	4.8	77.8

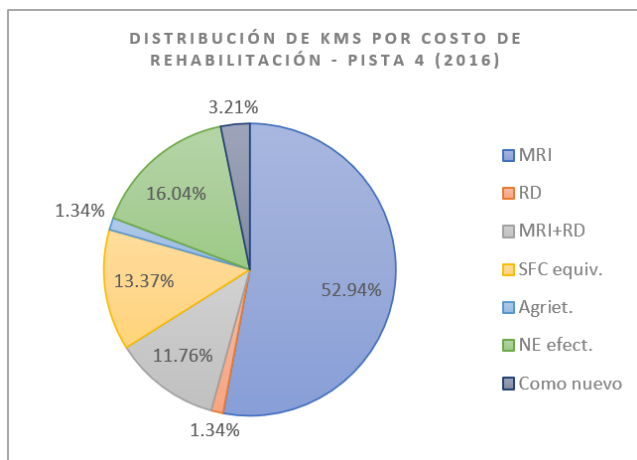
**Figura C.3.6:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 3 (Tramif: 1km, cont.).

Fuente: Elaboración propia.

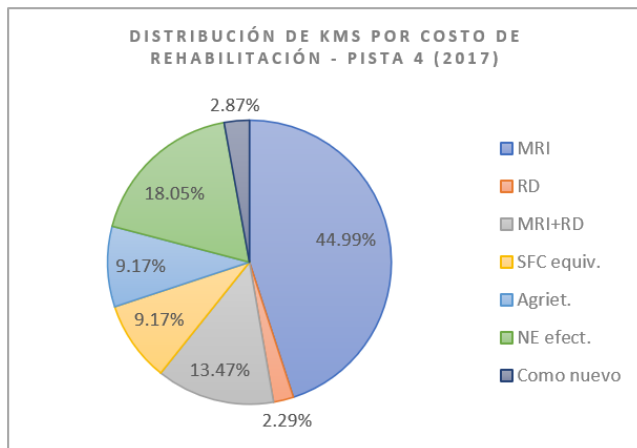
### C.3.4. Pista 4



	Año 2015							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	91	6	41	2	0	0	45	185
Km	18.2	1.2	8.2	0.4	0.0	0.0	9.0	37.0



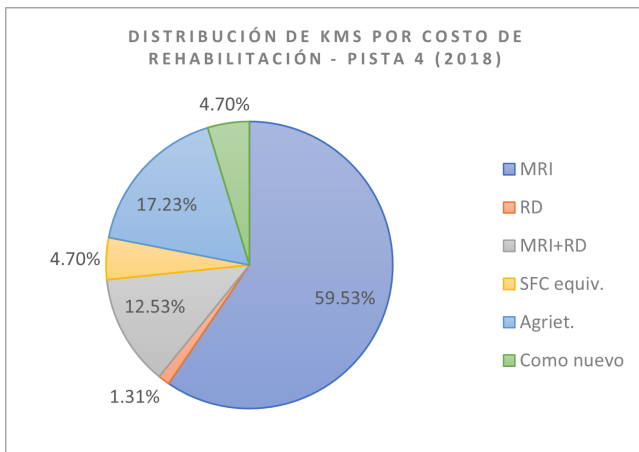
	Año 2016							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	198	5	44	50	5	60	12	374
Km	39.6	1.0	8.8	10.0	1.0	12.0	2.4	74.8



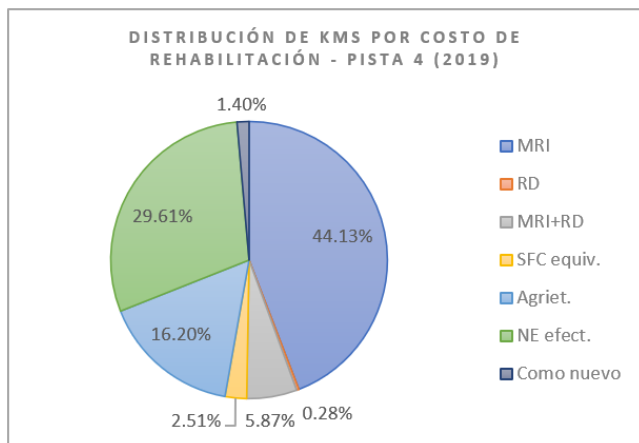
	Año 2017							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
# Secciones	157	8	47	32	32	63	10	349
Km	31.4	1.6	9.4	6.4	6.4	12.6	2.0	69.8

**Figura C.3.7:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 4 (tramif:1km).

Fuente: Elaboración propia.



# Secciones	Año 2018							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
Km	228	5	48	18	66	0	18	383
	45.6	1.0	9.6	3.6	13.2	0.0	3.6	76.6



# Secciones	Año 2019							Total
	MRI	RD	MRI+RD	SFC equiv.	Agriet.	NE efect.	Como nuevo	
Km	158	1	21	9	58	106	5	358
	31.6	0.2	4.2	1.8	11.6	21.2	1.0	71.6

**Figura C.3.8:** Distribución de kilómetros por costo de rehabilitación - Pista 4 (tramif:1km, cont.).

Fuente: Elaboración propia.

## **Apéndice D**

### **Metodologías alternativas para valoración de capacidad estructural**

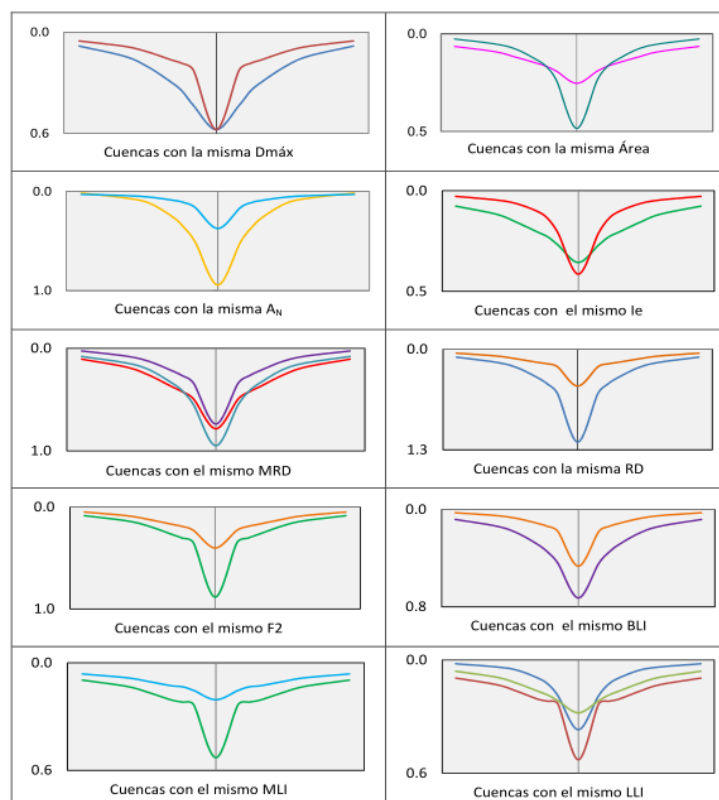
## D.1. Metodología preliminar para deflexiones del pavimento

A continuación, son revisados dos estudios donde se definieron planes de rehabilitación a partir de la relación entre indicadores estructurales y otros indicadores técnicos de pavimentos flexibles.

### I. Evaluación estructural de pavimentos flexibles con métodos de inteligencia artificial y auscultación no destructiva (Beltrán, 2012)

Se generó mediante sistemas de interferencia difusos una metodología que permite caracterizar el pavimento de manera rápida para inferir la condición de rigidez y deterioro de un pavimento, así como las decisiones de conservación. Los sistemas permitieron integrar directamente en la caracterización estructural de los pavimentos, tanto el conocimiento y criterios de expertos, como las variables de carácter subjetivo y cualitativo, que se utilizan comúnmente para describir los niveles de severidad del deterioro.

De este trabajo se resalta que para pavimentos con diferentes estructuras y respuestas de deflexión diversas, es factible obtener valores similares en los diferentes indicadores deducidos a partir de las cuencas. En la Figura D.1.1 se ilustran algunos ejemplos de estas situaciones.



**Figura D.1.1:** *Respuestas de deflexión diferentes con indicadores similares.*

Fuente: Beltrán, G. (2012)

De esta gráfica se puede concluir que no resulta suficiente valorar la capacidad estructural con base en cada indicador individual, sino que estos deben integrarse con los demás elementos de la evaluación para lograr una descripción más completa de la condición del pavimento.

Como resultado se obtuvo una matriz de decisión que relaciona la rigidez del pavimento y el nivel de deterioro presente, tal como se indica en la Figura D.1.2. Las categorías de rigidez y deterioro se establecieron tomando en cuenta las opiniones de expertos, mientras que la definición de las soluciones de rehabilitación o mantención se realizaron teniendo en cuenta las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México (SCT) y las recomendaciones de experiencias exitosas en conservación de pavimentos, encontradas en estudios previos a nivel local e internacional.

Las soluciones de la matriz son actividades de rehabilitación del pavimento que pueden cuantificarse monetariamente para una o más secciones del pavimento, por tanto, es posible utilizar de referencia esta metodología para valorizar los pavimentos flexibles.

RIGIDEZ	DETERIORO							
	Rotura severa	Deform. severa	Rotura media	Deform. media	Deform. ligera	Grietas ligeras	Baches ligeros	Adecuada
Pésima SB	Reconstrucción total (RECO TOT)		Refuerzo y Fresado + Reconstrucción a mediano plazo (REF Y FR1)	Refuerzo + Reconstrucción a mediano plazo (REF1)	Microcarpeta + Refuerzo a mediano plazo (MC1)	Sello + Refuerzo a mediano plazo (Sello1)	Bacheo + Refuerzo a mediano plazo (Bach1)	Monitoreo (MONIT)
Pésima B	Reconstrucción parcial (RECO CA y BG)							
Pésima CA	Reconstrucción superficial (RECO CA)		Refuerzo y Fresado (REF y FR)	Refuerzo (REF)	Renivelación local (RENI)	Sello con o sin calafateo (Sello)	Bacheo (Bach)	Nada
Mala SB	Reconstrucción total (RECO TOT)							
Mala B	Reconstrucción parcial (RECO CA y BG)							
Mala CA	Reconstrucción superficial (RECO CA)		Microcarpeta y fresado (MC y FR)	Microcarpeta (MC)	Renivelación local (RENI)	Sello con o sin calafateo (Sello)	Bacheo (Bach)	Nada
Regular	Refuerzo y fresado (REF y FR)	Refuerzo (REF)						
Riesgo	Microcarpeta y fresado (MC y FR)	Microcarpeta (MC)						
Adecuada								Nada

**Figura D.1.2:** Matriz de decisión para el sistema de reglas - SIDSoluciones.

Fuente: Beltrán y Romo (2014).

## II. Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica (Sanabria-Sandino et al., 2015)

En junio de 2015, el Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) de LanammeUCR en conjunto con la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) elaboraron un informe con la campaña de evaluación de la red vial año 2014-2015, donde se incluyeron mediciones de deflectometría de impacto. A partir de estos datos recolectados se agregó el componente de estrategias generales de intervención a nivel de red, que implica la asignación de una “nota de calidad Q” basada en la combinación espacial de los resultados de capacidad estructural así como la condición funcional para cada sección de control.

La sección de control es catalogada como candidata a un tipo generalizado de intervención, tales como mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción, con el fin de brindar una herramienta de gestión fundamentada en información científica que permita mejorar la toma de decisiones y aumente la eficiencia de la inversión en la red vial nacional. La definición de las notas de calidad Q, así como la consecuente estrategia de intervención, responde a un análisis a nivel de red y establece estrategias de intervención generales que deben ser adaptadas para la toma de decisiones a nivel de proyecto.

De esta forma, cuando dos secciones de control son consideradas candidatas a intervenciones tipo “mantenimiento” por ejemplo, se debe tomar en cuenta que dentro de esta definición es posible realizar una amplia gama de tipos de intervención, como pueden ser todos los tipos de “tratamientos de preservación”, tales como tratamientos superficiales “chip seals”, “slurry seals”, “sand seals”, “microsurfacing” y otros.

En la Figura D.1.3 se visualizan las notas de calidad Q basadas en categorías de FWD y rangos de IRI, mientras que en la Figura D.1.4 se agrupan las notas para la definición de estrategias.

Rangos de TPD		Límites de los valores de deflexión (10 <sup>-2</sup> mm)			
0 - 5 000		← 76,5	88,5	115,7	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
5 000 - 15 000		← 70,8	83,3	112,9	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
15 000 - 40 000		← 59,2	69,4	95,2	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
Casos Especiales		← 48,5	57,6	80,8	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS

INDICADOR ESTRUCTURAL		CATEGORÍAS DE FWD			
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
INDICADOR FUNCIONAL		▼	▼	▼	▼
Rangos de IRI (m/Km)	< 1,9 (Bueno)	▶ Q1	▶ Q3	▶ Q6	▶ R-1
	1,9 - 3,6 (Regular)	▶ Q2	▶ Q5	▶ Q8	▶ R-2
	3,6 - 6,4 (Malo)	▶ Q4	▶ Q7	▶ Q9	▶ R-3
	> 6,4 (Muy Malo)	▶ M-RF	▶ RH-RF	▶ R-3	▶ NP

**Figura D.1.3:** Notas de calidad Q basadas en categorías de FWD y rangos de IRI.

Fuente: Sanabria-Sandino et al. (2015).

A continuación serán descritas brevemente las intervenciones para cada nota de calidad:

- Q1:** intervenciones de tipo mantenimiento de preservación de bajo costo.
- Q2:** intervenciones de tipo mantenimiento de preservación de bajo costo, enfocadas en corregir la pérdida de capacidad funcional.
- Q3:** intervenciones de tipo mantenimiento de preservación de bajo costo, enfocadas a atender la pérdida de capacidad estructural y detener o retardar su avance.
- Q4:** intervenciones de tipo mantenimiento de mediano costo que deberían estar enfocadas a atender la pérdida de capacidad funcional en el corto plazo.

**M-RF:** intervenciones de tipo mantenimiento de alto costo que deberían estar enfocadas en recuperar la pérdida de capacidad funcional en el corto plazo para evitar mayor deterioro de la capacidad estructural.

**Q5:** sujetos de análisis más detallado a nivel de proyecto por encontrarse en una condición de capacidad estructural y funcional intermedia.

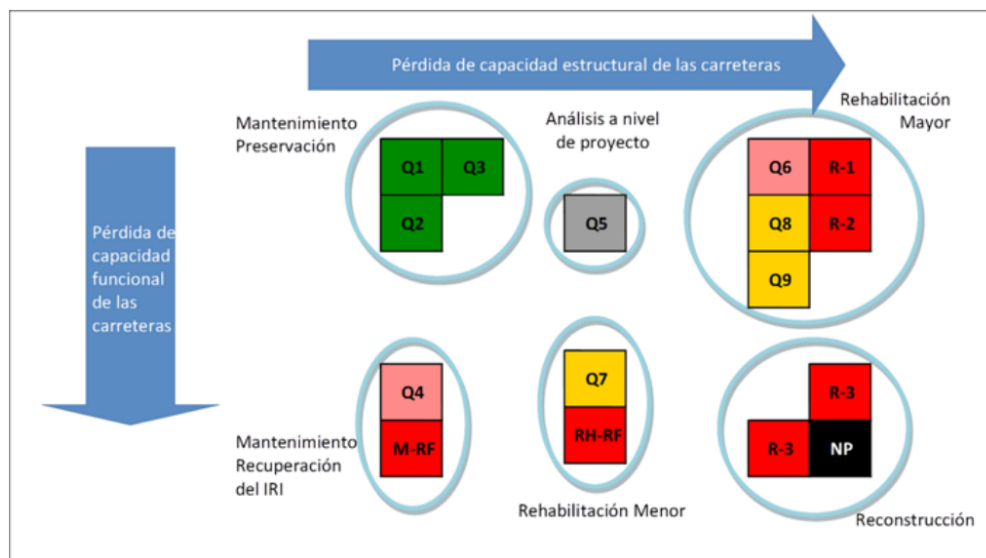
**Q7:** intervenciones de tipo “rehabilitación menor” que deberían estar enfocadas en recuperar la pérdida de capacidad funcional en el mediano plazo con el fin de evitar o retardar un mayor deterioro de la capacidad estructural.

**RH-RF:** intervenciones de tipo “rehabilitación menor” que deberían estar enfocadas en recuperar la pérdida de capacidad funcional y estructural en el corto plazo con el fin de evitar o retardar un mayor deterioro en el pavimento.

**Q6,Q-8,Q-9:** intervenciones de tipo rehabilitación mayor que debería ser atendida en el corto plazo.

**R1-R2:** intervenciones de tipo rehabilitación mayor que debería ser atendida de forma inmediata.

**R3-NP:** la única alternativa de intervención posible es la de reconstrucción total del pavimento y debe ser intervenido urgentemente.



**Figura D.1.4:** Agrupación de las notas de calidad para definición de estrategias.

Fuente: Sanabria-Sandino et al. (2015).

Al igual que para el trabajo desarrollado por Beltrán, las estrategias planteadas pueden cuantificarse monetariamente para una o más secciones del pavimento, por tanto, es posible utilizar de referencia esta metodología y límites de indicadores para valorizar los pavimentos flexibles.

En base a los estudios presentados, no es factible utilizar la misma metodología desarrollada para los indicadores MRI, RD, OASI, SFC equiv., y porcentaje de Agrietamiento, para definir una única actividad de rehabilitación cuando los indicadores de capacidad estructural llegan al nivel de desempeño “Malo”. Es necesario realizar una combinación de estos para poder establecer una acción que lleve efectivamente al pavimento a su estado como nuevo.

Por otra parte, ya que estos estudios cuentan con la participación de expertos locales para la definición de las actividades o estrategias de mantenimiento, se hace imprescindible realizar el mismo trabajo para la realidad nacional de Chile, contando con la opinión de especialistas viales tanto en el diseño, construcción y rehabilitación de pavimentos, cuya experiencia en el uso de estos indicadores sea efectiva y comprobada. Ante la falta de esta información, se hace esta propuesta preliminar de actividades para la valoración de pavimentos flexibles con el fin de que sea utilizada como punto de referencia en futuras investigaciones cuando se cuente con mayor experiencia nacional en el uso de estos indicadores técnicos.

### D.1.1. Definición de actividades de rehabilitación por indicador técnico

De acuerdo con la Tabla 2.3.7 los indicadores reflejan principalmente la condición estructural de las capas no superficiales, por lo que la definición de actividades de rehabilitación debe incluir estos materiales. De la misma forma, de los estudios se desprende que desempeños deficientes de estos indicadores necesitan de actividades de rehabilitaciones mayores o reconstrucciones, por lo que la propuesta se sustentará bajo esta línea. El detalle de las partidas se encuentra en la Sección D.1.3.

#### a) Índice de capa base BLI

El indicador BLI refleja la condición estructural de la capa base o capas asociadas a la profundidad evaluada hasta los 300 mm aproximadamente, por lo tanto, se propone que cuando el indicador alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **reconstrucción del pavimento hasta la capa base**. En la Tabla D.1.1 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado (para los demás tipos de base se aplican los mismos porcentajes).

**Tabla D.1.1:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador BLI (caso base granular).

Nivel de desempeño	BLI (50 m) [ $\mu m$ ]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{BLI}$ [%]
Muy Bueno	$\leq 50$	0
Bueno	(50, 100]	25
Justo	(100, 200]	50
Malo	(200, 300]	100
Muy Malo	> 300	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un BLI igual a 103 [ $\mu m$ ], la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 50 % del costo de una reconstrucción hasta la capa base, en [UF]. La cantidad de actividad ejecutada dependerá de los espesores del tramo evaluado.

### b) Índice de capa media MLI

El indicador MLI refleja la condición estructural de la subbase o capas asociadas a la profundidad evaluada desde 300 hasta 600 mm aproximadamente, por lo tanto, se propone que cuando el indicador alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **reconstrucción del pavimento hasta la capa de subbase**. En la Tabla D.1.2 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado (para los demás tipos de base se aplican los mismos porcentajes).

**Tabla D.1.2:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador MLI (caso base granular).

Nivel de desempeño	MLI (50 m) [ $\mu\text{m}$ ]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{MLI}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 40$	0
<b>Bueno</b>	(40, 70]	25
<b>Justo</b>	(70, 100]	50
<b>Malo</b>	(100, 200]	100
<b>Muy Malo</b>	$> 200$	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un MLI igual a 45 [ $\mu\text{m}$ ], la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25% del costo de una reconstrucción hasta la capa subbase, en [UF]. La cantidad de actividad ejecutada dependerá de los espesores del tramo evaluado.

### c) Índice de capa inferior LLI

El indicador LLI refleja la condición estructural de las capas bajas y subrasante o capas asociadas a la profundidad evaluada desde 600 hasta 900 mm aproximadamente, por lo tanto, se propone que cuando el indicador alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **reconstrucción total del pavimento más el mejoramiento de la subrasante**. En la Tabla D.1.3 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado (para los demás tipos de base se aplican los mismos porcentajes).

**Tabla D.1.3:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador LLI (caso base granular).

Nivel de desempeño	LLI (50 m) [ $\mu\text{m}$ ]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{LLI}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 30$	0
<b>Bueno</b>	(30, 40]	25
<b>Justo</b>	(40, 50]	50
<b>Malo</b>	(50, 100]	100
<b>Muy Malo</b>	$> 100$	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un LLI igual a 35 [ $\mu\text{m}$ ], la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25% del costo de una reconstrucción total con un mejoramiento de la subrasante, en [UF]. La cantidad de actividad ejecutada dependerá de los espesores del tramo evaluado.

**d) Deflexión máxima  $D_0$** 

El indicador  $D_0$  refleja la condición de todas las capas estructurales con una contribución del 70% de la subrasante, por lo tanto, se propone que cuando el indicador alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida calculada sea equivalente al valor de una **reconstrucción total del pavimento (sin incluir un mejoramiento de la subrasante)**. En la Tabla D.1.4 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado (para los demás tipos de base se aplican los mismos porcentajes).

**Tabla D.1.4:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador  $D_0$  (caso base granular,  $EE > 20$  millones).

Nivel de desempeño	$D_0$ (50 m) [ $\mu m$ ]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{D_0}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	$\leq 200$	0
<b>Bueno</b>	(200, 300]	25
<b>Justo</b>	(300, 400]	50
<b>Malo</b>	(400, 500]	100
<b>Muy Malo</b>	$> 500$	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un  $D_0$  igual a 250 [ $\mu m$ ], la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25% del costo de una reconstrucción total, en [UF]. La cantidad de actividad ejecutada dependerá de los espesores del tramo evaluado.

**Alternativas para evaluación con indicadores estructurales**

Dadas las opciones de actividades de rehabilitación para los indicadores estructurales, esta propuesta preliminar de valoración presenta tres alternativas de indicadores considerados para la evaluación. En la Tabla D.1.5 se aprecian las opciones propuestas.

**Tabla D.1.5:** Indicadores técnicos considerados en la valoración de pavimentos flexibles (propuesta preliminar).

Opción	Indicadores técnicos								
	MRI	RD	OASI	SFC EQUIV.	PORCENTAJE AGRIET.	$D_0$	BLI	MLI	LLI
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
2	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
3	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Como se aprecia en la tabla anterior, en las tres opciones se consideran los indicadores MRI, RD, OASI, SFC equiv. y porcentaje de Agrietamiento para la valoración del activo. Esto se debe a que existe un mayor respaldo de las actividades de rehabilitación asociadas a cada uno. Nuevamente se recalca que las actividades definidas se relacionan con la pérdida de valor y no con un plan de mantenimiento que deba ejecutar el concesionario.

Por otra parte, los indicadores provenientes de la deflectometría de impacto fueron distribuidos de manera tal que se evalúe la condición de la totalidad del paquete estructural. Una mejor manera de evaluar el

valor del pavimento es considerar los cuatro indicadores de manera simultánea (en conjunto con los otros indicadores), sin embargo, la metodología propuesta asocia un indicador técnico con una actividad de rehabilitación, lo que se contradice con la conclusión de que los parámetros del cuenco de deflexiones se deben integrar con otros elementos de evaluación.

Dada la compatibilidad de la metodología de valoración del patrimonio vial con el nivel de servicio a los usuarios, es necesario definir cuánta pérdida de valor se tiene, por ejemplo, en los siguientes casos:

**Tabla D.1.6:** Ejemplos de niveles de desempeño de los indicadores de capacidad estructural.

Casos	Nivel de desempeño			
	D <sub>0</sub>	BLI	MLI	LLI
1	Muy Malo	Justo	Malo	Malo
2	Muy Malo	Justo	Malo	Muy Malo
3	Bueno	Bueno	Bueno	Justo
4	Justo	Bueno	Justo	Malo
5	Bueno	Justo	Bueno	Muy Bueno

Los ejemplos de la Tabla D.1.6 se obtuvieron a partir de datos de una concesión vial chilena, por lo que representan casos reales que deben ser evaluados en el método de valoración. Las actividades de rehabilitación para cada indicador y las opciones de valoración (Tabla D.1.5) tratan de combinar la compatibilización de los objetivos estratégicos (servicio a usuarios y preservación del patrimonio) y ajustarse al método de valoración escogido.

Cuando se disponga de información práctica con respecto a rehabilitación de pavimentos a partir de los indicadores técnicos del cuenco de deflexiones se podrá sustentar o mejorar la propuesta realizada.

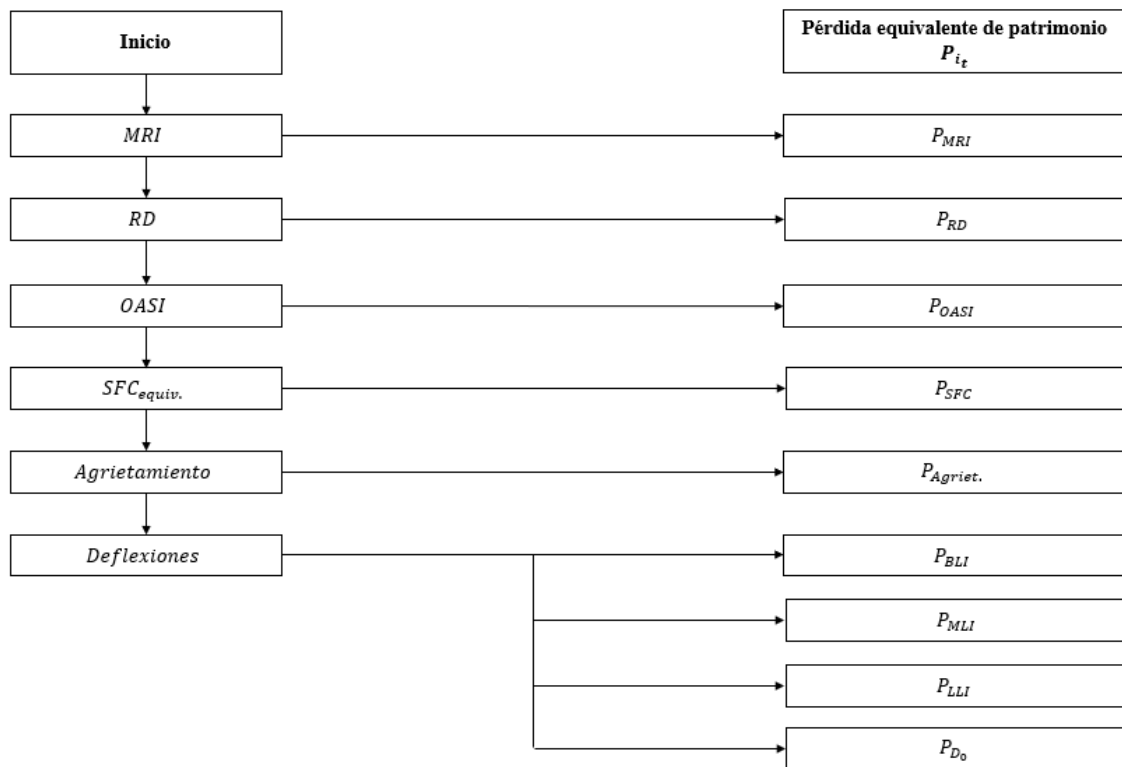
### D.1.2. Formulación del costo de rehabilitación

Se presenta el esquema y fórmulas de valoración con la propuesta preliminar. El método de valoración es similar al anterior, solo que considera los indicadores de deflectometría de impacto, D<sub>0</sub>, BLI, MLI y LLI.

$$CRehab_{ut} = \max \{ CRh_{MRI_t}, CRh_{RD_t}, CRh_{OASI_t}, CRh_{SFC_t}, CRh_{Agr_t}, CRh_{Deflexiones_t} \} \tag{D.1.1}$$

$$CRh_{Deflexiones_t} = \begin{cases} CRh_{D_0_t} \\ CRh_{BLI_t}, CRh_{MLI_t} \\ CRh_{BLI_t}, CRh_{MLI_t}, CRh_{LLI_t} \end{cases} \tag{D.1.2}$$

Se hace la distinción de las tres alternativas (Tabla D.1.5) para el caso de los indicadores de deflectometría.



**Figura D.1.5:** Esquema para el costo de rehabilitación de pavimentos asfálticos (propuesta preliminar).

Fuente: Elaboración propia.

### D.1.3. Detalle de partidas por indicador técnico

Las partidas han sido itemizadas según Manual de Carreteras, Volumen 5 (MOP, 2020-d) y los precios unitarios deben ser definidos en el contrato de licitación correspondiente. Cabe destacar que, el precio unitario de las partidas involucra el suministro de todos los materiales, equipos y mano de obra necesarios, incluso su transporte y colocación, compactación, terminación y demás trabajos y actividades requeridos para cumplir con lo especificado en la correspondiente sección del Manual de Carreteras.

El ancho de pista, los espesores de carpeta de rodadura, de carpeta intermedia (binder), de la capa base y de la subbase se definen como “b”, “ $h_{CR}$ ”, “ $h_{CI}$ ”, “ $h_{BG}$ ” y “ $h_{SBG}$ ”, respectivamente. Todas las dimensiones se encuentran en m. Las partidas involucradas en el cálculo del costo de rehabilitación podrían cambiar en función de la estructura de pavimento evaluada.

**a) Índice de capa base BLI**

Dado que el indicador BLI se reporta en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada para esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla D.1.7.

**Tabla D.1.7:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador BLI (caso capas granulares).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.300	CAPAS GRANULARES		
302-1	Base Granular, $CBR \geq 80\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{BG} \cdot b$
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{CR} \cdot b$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	$50 \cdot h_{CI} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

**b) Índice de capa media MLI**

Dado que el indicador MLI se reporta en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada para esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla D.1.8.

**Tabla D.1.8:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador MLI (caso capas granulares).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.300	CAPAS GRANULARES		
301-1	Sub-base Granular, $CBR \geq 40\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{SBG} \cdot b$
302-1	Base Granular, $CBR \geq 80\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{BG} \cdot b$
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{CR} \cdot b$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	$50 \cdot h_{CI} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

**c) Índice de capa inferior LLI**

Dado que el indicador LLI se reporta en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada para esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla D.1.9.

**Tabla D.1.9:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador LLI (caso capas granulares).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.200	MOVIMIENTO DE TIERRAS		
209-1	Preparación de la Subrasante	$m^2$	$50 \cdot b$
5.300	CAPAS GRANULARES		
301-1	Sub-base Granular, $CBR \geq 40\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{SBG} \cdot b$
302-1	Base Granular, $CBR \geq 80\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{BG} \cdot b$
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{CR} \cdot b$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	$50 \cdot h_{CI} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

**d) Deflexión máxima  $D_0$** 

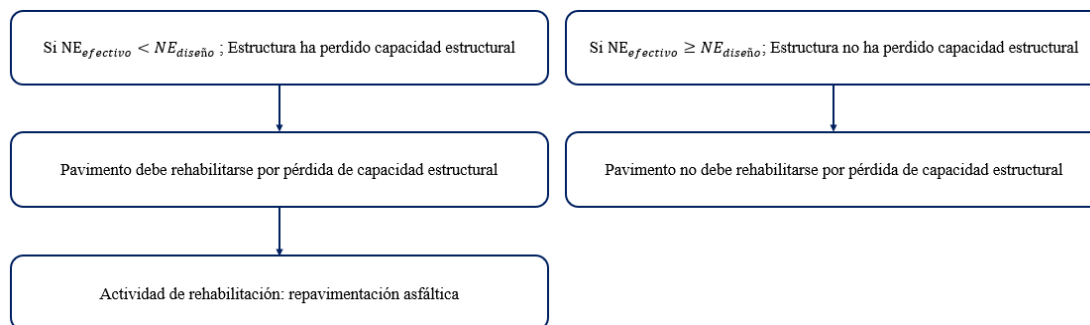
Dado que el indicador  $D_0$  se reporta en secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada para esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla D.1.10.

**Tabla D.1.10:** Partidas y bases de medición para actividad de rehabilitación de indicador  $D_0$  (caso capas granulares).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.300	CAPAS GRANULARES		
301-1	Sub-base Granular, $CBR \geq 40\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{SBG} \cdot b$
302-1	Base Granular, $CBR \geq 80\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{BG} \cdot b$
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{CR} \cdot b$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	$50 \cdot h_{CI} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

## D.2. Metodología alternativa para número estructural efectivo

Si se compara el  $NE_{efectivo}$  con el  $NE_{diseño}$  se puede obtener la pérdida de capacidad estructural del pavimento con el paso del tiempo, permitiendo definir una actividad de rehabilitación que lleve al pavimento a su estado “como nuevo”. En función de lo anterior se tiene el siguiente esquema:



**Figura D.2.1:** Comparación y línea de acción entre  $NE$  efectivo y  $NE$  diseño del pavimento.

Fuente: Elaboración propia.

La actividad de rehabilitación que ha sido considerada es una repavimentación asfáltica (fresado y recapado asfáltico). Para definir el espesor de repavimentación asociado a la pérdida de capacidad estructural, se han utilizado como base los coeficientes estructurales recomendados para pavimentos existentes del Manual de Carreteras, tal como lo indica la Tabla D.2.1.

**Tabla D.2.1:** Coeficientes estructurales recomendados para pavimentos existentes, Tabla 3.605.203.A (MOP, 2019-c).

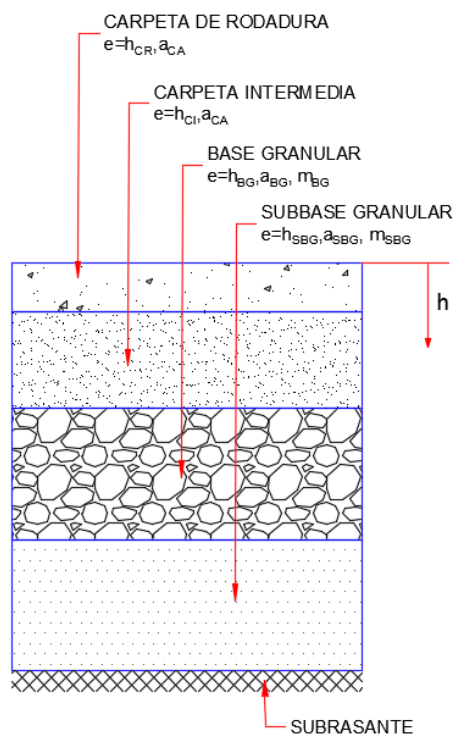
CAPA	CONDICION SUPERFICIAL	COEFICIENTE
Capa	Poco o casi nada de grietas de fatiga y/o grietas transversales ancho $\leq 6$ mm	0,35 a 0,40
	<10% grietas de fatiga de severidad baja y/o < 5% grietas transversales ancho < 6 mm	0,35 a 0,40
	>10% grietas de fatiga de severidad baja y/o <10% grietas de fatiga de severidad media y/o >5-10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,20 a 0,30
	> 10% grietas de fatiga de severidad media y/o < 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,14 a 0,20
Base tratada	> 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 19 mm	0,08 a 0,15
	Poco o casi nada de grietas de fatiga y/o sólo grietas transversales de ancho $\leq 6$ mm	0,20 a 0,35
	<10% grietas de fatiga de severidad baja y/o < 5% grietas transversales ancho < 6 mm	0,15 a 0,25
	>10% grietas de fatiga de severidad baja y/o <10% grietas de fatiga de severidad media y/o >5-10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,15 a 0,20
Bases y subbases Granulares	> 10% grietas de fatiga de severidad media y/o < 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,10 a 0,20
	> 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 19 mm	0,08 a 0,15
	Sin evidencias de surgencia de finos, degradación o contaminación con finos.	0,10 a 0,14
	Con alguna evidencia de surgencia de finos, degradación o contaminación con finos	0,00 a 0,10

A partir de la tabla anterior, se proponen coeficientes estructurales para las capas asfálticas (carpeta de rodadura e intermedias) en función del nivel de desempeño del indicador de agrietamiento, tal como se indica en la Tabla D.2.2.

**Tabla D.2.2:** Propuesta de coeficientes estructurales para capas asfálticas en función del nivel de desempeño del indicador de agrietamiento.

Nivel de desempeño Agrietamiento	Agriet. (50m) [ % ]	Coef. Estructural Capas asfálticas, $a_{CA}$
Muy Bueno	[0.0, 4.0[	0.40
Bueno	[4.0, 7.0[	0.38
Justo	[7.0, 10.0[	0.35
Malo	[10.0, 15.0]	0.30
Muy Malo	> 15.0	0.20

Para visualizar de mejor forma el cálculo del espesor de repavimentación asfáltica que lleva al pavimento a su condición “como nuevo”, se tiene el esquema de la Figura D.2.2 donde se presenta una estructura típica de pavimentos flexibles de carreteras concesionadas chilenas. En el esquema se observan las diferentes capas de pavimento con sus respectivos espesores y coeficientes estructurales y de drenaje.



**Figura D.2.2:** Esquema de paquete estructural típico de pavimentos asfálticos.

Fuente: Elaboración propia.

La expresión siguiente detalla el espesor de repavimentación asfáltica “h” que permite valorizar el pavimento:

$$h = \frac{NE_{diseño} - NE_{efectivo}}{0.43 - a_{CA}} \tag{D.2.1}$$

Donde:

- $h$  : Espesor de repavimentación necesario para restablecer el  $NE_{diseño}$ , en [cm].
- $NE_{diseño}$  : Número estructural de diseño, según lo dispuesto en la sección 3.604 del Manual de Carreteras (MOP, 2019-b), en [cm].
- $NE_{efectivo}$  : Número estructural efectivo proveniente del ensayo de deflectometría de impacto (Ecuación 2.3.4), en [cm].
- 0.43 : Coeficiente estructural de concreto asfáltico de superficie, según Tabla 3.604.107.A del Manual de Carreteras (MOP, 2019-b).
- $a_{CA}$  : Coeficiente estructural para las capas asfálticas, según Tabla D.2.2.

Como puede observarse, el espesor necesario se obtiene principalmente a partir del aporte estructural de las capas asfálticas. Una vez calculado el espesor de repavimentación es posible diferenciar dos casos: cuando el espesor comprende parte de las capas asfálticas del pavimento o cuando el espesor requerido incluye remover una fracción o la totalidad de las capas bajas (base y/o subbase). En función de lo anterior, se definen dos actividades de rehabilitación a partir de la Ecuación D.2.1.

**Tabla D.2.3:** Propuesta de actividades de rehabilitación a partir del NE efectivo.

Casos	Actividad de rehabilitación
$h \leq h_{CA}$	Fresado y recapado de espesor “h” (FREC)
$h > h_{CA}$	Reconstrucción pavimento (REC)

$h_{CA}$ : espesor total de capas asfálticas, en [cm].

$$h_{CA} = h_{CR} + h_{CI}$$

Se propone valorizar con una reconstrucción del pavimento cuando el espesor de repavimentación sea mayor al de las capas asfálticas, ya que si es necesaria una repavimentación mayor a la original, implica que el pavimento ha perdido suficiente capacidad estructural como para volver a su estado “como nuevo”, a través de una reconstrucción. Por otra parte, en la práctica habitual de rehabilitaciones de pavimentos de carreteras no se remueve parte de las capas granulares, sino que se reconstruye todo el paquete estructural. La reconstrucción del pavimento implica la remoción del pavimento existente y la preparación o mejoramiento del suelo de subrasante.

Si bien estas actividades de rehabilitación pueden ser utilizadas para determinar el costo que implica llevar al pavimento a su condición original, la metodología propuesta no es similar a la desarrollada para los otros indicadores técnicos (MRI, RD, SFC equiv., Porcentaje de agrietamiento) que establece una

única actividad de rehabilitación para cada indicador y porcentajes del costo de esta actividad en función del nivel de desempeño. A partir de las fórmulas y conceptos presentados anteriormente, se definirá un nuevo indicador técnico que permita evaluar la pérdida de capacidad estructural y que sea compatible con el método de valorización ya desarrollado.

### D.2.1. Definición de un indicador técnico

Con todos los conceptos presentados en la Sección 2.3.7.2, se define el indicador de capacidad estructural como se muestra en la Ecuación D.2.2:

$$ICE = \frac{NE_{efectivo_{sector}}}{NE_{diseño_{tramo}} [\%]} \quad (D.2.2)$$

Donde:

$ICE$  : Índice de capacidad estructural, en [%].

$NE_{efectivo_{sector}}$  : Número estructural efectivo promedio del sector evaluado, en [cm]. La definición del sector se puede realizar mediante las tramificaciones dispuestas en la Sección 2.3.7.2.

$NE_{diseño_{tramo}}$  : Número estructural del tramo de diseño correspondiente al sector evaluado, obtenido según lo dispuesto en la sección 3.604 del Manual de Carreteras (MOP, 2019-b), en [cm].

Definir un indicador técnico permite establecer umbrales para cada uno de los niveles de desempeño utilizados al evaluar el nivel de servicio entregado a los usuarios de una vía (Muy Bueno, Bueno, Justo, Malo y Muy Malo). Es necesario, por lo tanto, determinar estos umbrales y la actividad de rehabilitación asociada cuando el indicador alcanza el nivel “Malo”.

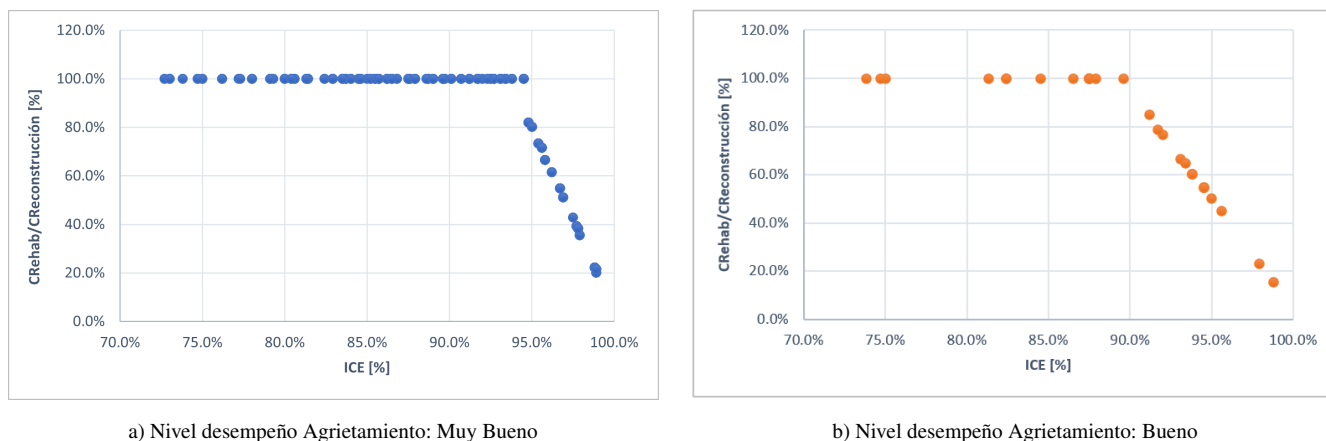
De acuerdo con la Tabla D.2.3, las actividades de rehabilitación propuestas corresponden a un fresado y recapado (FREC) o a una reconstrucción del pavimento (REC). A partir de lo anterior, se ha evaluado para los datos disponibles, la actividad de rehabilitación para cada sección y su relación con el valor del indicador ICE respectivo.

El procedimiento para determinar la relación entre los costos de rehabilitación y el indicador de capacidad estructural se detalla a continuación:

1. Para cada sección se calcula el espesor “h” de repavimentación asfáltica, de acuerdo con la Ecuación D.2.1. Esto se realiza para cada sección donde se cumple que  $NE_{efectivo_{sección}} < NE_{diseño_{tramo}}$ ; para las demás secciones el costo de rehabilitación por pérdida de capacidad estructural es cero.
2. A partir del espesor “h” y del espesor de capas asfálticas de la sección,  $h_{CA}$ , se determina si la actividad corresponde a un fresado y recapado o a una reconstrucción.

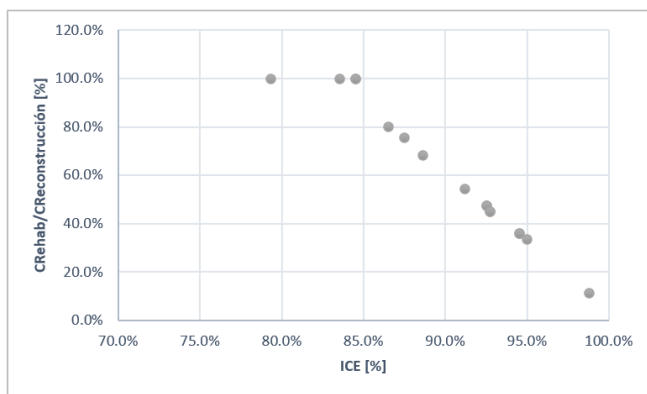
3. Se calcula el costo asociado a la actividad de rehabilitación. Las partidas y precios unitarios considerados corresponden a los presentados en los últimos contratos de concesiones (MOP, 2019-a; MOP, 2021). Para el cálculo de FREC se consideran solo las partidas de fresado del pavimento (305-8), riego de liga (402-1) y concreto asfáltico de rodadura (408-1). Las cantidades de material o actividad se obtienen a partir de las características de la estructura del pavimento de la sección.
4. Para cada sección se obtiene el ratio entre el costo de la actividad definida (FREC o REC) y el costo de reconstrucción de la sección (REC), definido como  $CRehab/CREconstrucción$ . Lo anterior se realiza con el objetivo de definir la reconstrucción como actividad de rehabilitación cuando se alcanza el nivel “Malo”. Esto quiere decir que cuando una sección tiene definida como actividad de rehabilitación la reconstrucción, el ratio  $CRehab/CREconstrucción$  es igual a 100%.
5. Se calcula el indicador ICE para cada sección y se relaciona con el ratio  $CRehab/CREconstrucción$ . Como el espesor “h” se define a partir del nivel de agrietamiento de la sección (a través del coeficiente  $a_{CA}$ ), los datos se diferencian en función de cada nivel de desempeño (Figura D.2.3 y D.2.4).

Cada paso descrito se realiza para la información disponible que corresponde a mediciones de deflectometría de impacto en una carretera chilena (caso de estudio). Las mediciones se realizaron en las pistas lentas (pesadas) cada 200 m para los años 2016, 2017 y 2019. Los datos de las siguientes gráficas fueron agrupados según una tramificación cada 1 km, pero el comportamiento para las demás tramificaciones es similar.

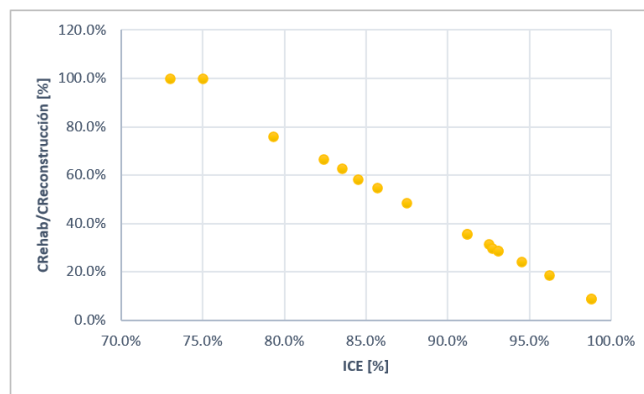


**Figura D.2.3:** Relación ratio  $CRehab/CREconstrucción$  vs ICE según nivel de desempeño de Agrietamiento.

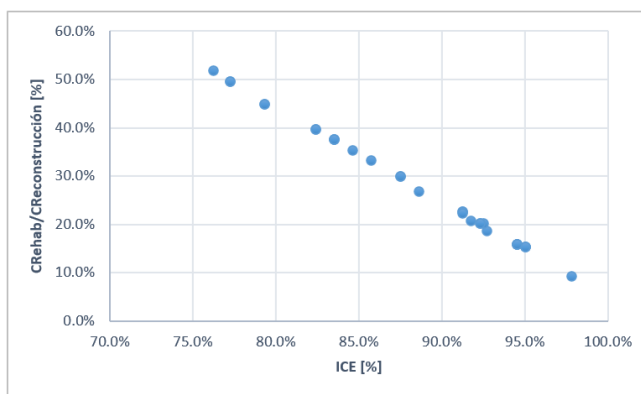
Fuente: Elaboración propia.



c) Nivel desempeño Agrietamiento: Justo



d) Nivel desempeño Agrietamiento: Malo



e) Nivel desempeño Agrietamiento: Muy Malo

**Figura D.2.4:** Relación ratio  $C_{Rehab}/C_{Reconstrucción}$  vs ICE según nivel de desempeño de Agriet.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, existe una tendencia clara de la relación entre los costos de la actividad de rehabilitación y el indicador de capacidad estructural para cada nivel de desempeño del agrietamiento. Para cada nivel existe un valor de ICE que limita si la actividad es un fresado y recapado o una reconstrucción, por ejemplo, para el nivel Muy Bueno (figura a), este límite es aproximadamente un 95 %. Esto significa que todas las secciones que se encuentran en este nivel de desempeño, y el indicador es menor a 95 %, la actividad de rehabilitación es una reconstrucción.

Esta relación se puede explicar por las características de la estructura de pavimento y la fórmula definida para el espesor “h” de repavimentación, la cual se puede reordenar de la siguiente manera:

$$\frac{NE_{efectivo_{sector}}}{NE_{diseño_{tramo}}} = 1 - \frac{h \cdot (0.43 - a_{CA})}{NE_{diseño_{tramo}}} \tag{D.2.3}$$

Cuando  $h > h_{CA}$ , la actividad de rehabilitación es una reconstrucción, por tanto, es necesario revisar estas variables para cada tramo de diseño de la carretera (Tabla D.2.4).

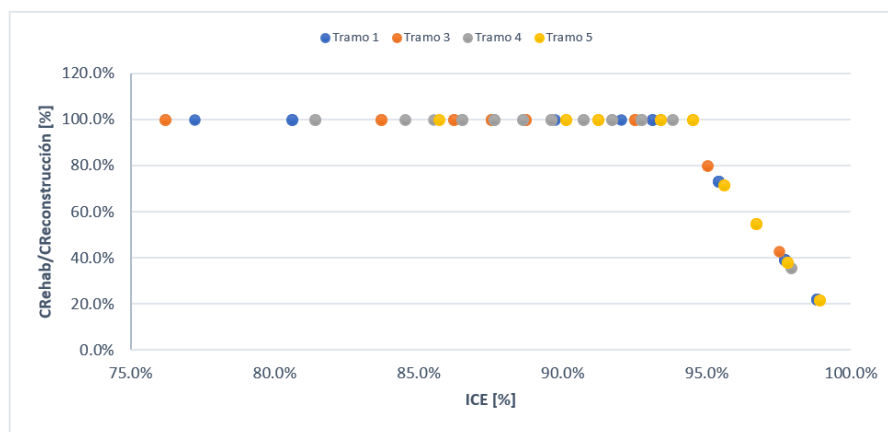
**Tabla D.2.4:** *Espesor asfáltico y número estructural de diseño por tramos para vía analizada.*

Tramo diseño	$h_{CA}$ [cm]	$NE_{diseño, tramo}$ [cm]
T1	15.5	8.8
T2	19.0	10.4
T3	14.0	8.0
T4	17.5	9.7
T5	16.0	9.1

Para los valores anteriores, el límite del indicador ICE para cada nivel de Agriet. se detalla en la Tabla D.2.5. Por otra parte, en la Figura D.2.5 se presenta la relación entre el ratio  $CR_{Rehab}/CR_{Reconstrucción}$  y el indicador ICE para el nivel de Agriet. “Muy Bueno”, diferenciando las secciones según el tramo de diseño.

**Tabla D.2.5:** *Valor límite de ICE que define la actividad de rehabilitación para la vía analizada.*

Tramo diseño	Nivel de desempeño de agrietamiento				
	MB	B	J	M	MM
<b>T1</b>	94.72 %	91.19 %	85.91 %	77.10 %	59.49 %
<b>T2</b>	94.52 %	90.87 %	85.38 %	76.25 %	57.98 %
<b>T3</b>	94.75 %	91.25 %	86.00 %	77.25 %	59.75 %
<b>T4</b>	94.59 %	90.98 %	85.57 %	76.55 %	58.51 %
<b>T5</b>	94.73 %	91.21 %	85.93 %	77.14 %	59.56 %
<b>Promedio</b>	94.66 %	91.10 %	85.76 %	76.86 %	59.06 %



**Figura D.2.5:** *Relación ratio  $CR_{Rehab}/CR_{Reconstrucción}$  vs ICE por tramos de diseño.*

Fuente: Elaboración propia.

De los gráficos y tablas anteriores, es posible distinguir que para cada nivel de agrietamiento y tramo de diseño existe un valor límite distinto que establece si se realiza una u otra actividad de rehabilitación, por lo que no es posible generalizar. De la misma manera, no existe un patrón para las secciones de cada tramo de diseño (Figura D.2.5), comportamiento que se repite para los demás niveles de desempeño del agrietamiento. Además, otras rutas podrían tener comportamientos totalmente diferentes a los presentados, sin embargo, a partir de estos resultados es posible sacar algunas conclusiones:

- Se puede establecer un umbral de capacidad estructural que se asocie a la actividad de rehabilitación “reconstrucción” como parte de la metodología de valorización. Aunque los valores de la Tabla D.2.5 muestran diferencias según el nivel de agrietamiento y tramo de diseño, en promedio, secciones con valores de ICE menores a 80% tendrían una pérdida de valor equivalente al costo de una reconstrucción.
- Existe incertidumbre asociada al nivel de agrietamiento, ya que este puede ser corregido mediante actividades como sellos asfálticos o sello de grietas, que no incrementan la capacidad estructural del pavimento. Es decir, una sección podría tener un agrietamiento “Muy Bueno” debido a la ejecución de una de estas actividades y tener todas sus capas asfálticas agrietadas. Como no se dispone de información sobre las actividades de rehabilitación de esta ruta, esta variable no ha podido ser incorporada en el análisis.
- La metodología presentada para el indicador de capacidad estructural puede ser utilizada para valorizar el pavimento, pero debe ser validada con datos de otras carreteras. A pesar de lo anterior, se propone una metodología similar a la de los demás indicadores de pavimento.

### I. Propuesta 1: “L100 %”

A partir de curvas como las de la Figura 2.3.8 se establece un rango de 5% para cada nivel de desempeño del indicador. De acuerdo con lo presentado, se propone que cuando el indicador ICE alcance el nivel de desempeño “Malo”, la pérdida de patrimonio sea equivalente al valor de una **reconstrucción del pavimento, incluyendo un mejoramiento de la subrasante**. En la Tabla D.2.6 se detallan los rangos para cada nivel de desempeño y su porcentaje asociado.

**Tabla D.2.6:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador ICE en pavimentos flexibles (propuesta 1).

Nivel de desempeño	ICE (50m) [%]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{ICE}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	$\geq 100$	0
<b>Bueno</b>	[95, 100)	25
<b>Justo</b>	[90, 95)	50
<b>Malo</b>	[85, 90)	100
<b>Muy Malo</b>	< 85	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un ICE igual a 98%, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 25% del costo de una reconstrucción total y mejoramiento de la subrasante, en [UF]. La cantidad de actividad ejecutada dependerá de los espesores del tramo evaluado.

## II. Propuesta 2: “L95 %”

Considerando el mismo rango de 5% y bajo el supuesto de que variaciones pequeñas no representan un cambio en la capacidad estructural del pavimento, se hace una segunda propuesta de valoración modificando los umbrales para los distintos niveles de desempeño, tal como se indica en la Tabla D.2.7. De esta forma, se establece un umbral de 85% para que la **reconstrucción** sea considerada como actividad de rehabilitación que lleve al pavimento a su condición “como nuevo”, valor cercano al promedio de la Tabla D.2.5.

**Tabla D.2.7:** Porcentajes del costo de la actividad de rehabilitación por nivel de desempeño para indicador ICE en pavimentos flexibles (propuesta 2).

Nivel de desempeño	ICE (50m) [%]	Pérdida respecto al costo de la actividad $P_{ICE}$ [%]
<b>Muy Bueno</b>	$\geq 95$	0
<b>Bueno</b>	[90, 95)	25
<b>Justo</b>	[85, 90)	50
<b>Malo</b>	[80, 85)	100
<b>Muy Malo</b>	$< 80$	200

Dados estos porcentajes, si una sección de 50 m tiene un ICE igual a 88%, la pérdida equivalente del valor del activo corresponde a un 50% del costo de una reconstrucción total y mejoramiento de la subrasante, en UF. La cantidad de actividad ejecutada dependerá de los espesores del tramo evaluado.

### D.2.2. Detalle de partidas por indicador técnico

Las partidas han sido itemizadas según Manual de Carreteras, Volumen 5 (MOP, 2020-d) y los precios unitarios deben ser definidos en el contrato de licitación correspondiente. Cabe destacar que, el precio unitario de las partidas involucra el suministro de todos los materiales, equipos y mano de obra necesarios, incluso su transporte y colocación, compactación, terminación y demás trabajos y actividades requeridos para cumplir con lo especificado en la correspondiente sección del Manual de Carreteras.

El ancho de pista, los espesores de carpeta de rodadura, de carpeta intermedia (binder), de la capa base y de la subbase se definen como “b”, “ $h_{CR}$ ”, “ $h_{CI}$ ”, “ $h_{BG}$ ” y “ $h_{SBG}$ ”, respectivamente. Todas las dimensiones se encuentran en m. Las partidas involucradas en el cálculo del costo de rehabilitación podrían cambiar en función de la estructura de pavimento evaluada.

## I. Propuesta 1: “L100 %”

Dado que el indicador ICE será asignado a secciones de 50 m, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada en esta actividad de rehabilitación son detalladas en la Tabla D.2.8.

**Tabla D.2.8:** Partidas, bases de medición y cantidad de obra para el cálculo del costo de rehabilitación de indicador ICE (caso capas granulares).

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
5.200	MOVIMIENTO DE TIERRAS		
209-1	Preparación de la Subrasante	$m^2$	$50 \cdot b$
5.300	CAPAS GRANULARES		
301-1	Sub-base Granular, $CBR \geq 40\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{SBG} \cdot b$
302-1	Base Granular, $CBR \geq 80\%$	$m^3$	$50 \cdot h_{BG} \cdot b$
5.400	REVESTIMIENTO Y PAVIMENTOS		
401-1	Imprimación	$m^2$	$50 \cdot b$
402-1	Riego de Liga	$m^2$	$50 \cdot b$
408-1	Concreto Asfáltico de Rodadura	$m^3$	$50 \cdot h_{CR} \cdot b$
408-2	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	$m^3$	$50 \cdot h_{CI} \cdot b$
7.300	OPERACIONES DE MANTENIMIENTO		
305-8	Fresado de Pavimento Asfáltico	$m^2$	$50 \cdot b$

Las partidas involucradas en el cálculo del costo de rehabilitación podrían cambiar en función de la estructura de pavimento evaluada, por ejemplo, que los materiales granulares tengan valores distintos de CBR o que la capa de base sea de otra materialidad.

## II. Propuesta 1: “L95 %”

Al igual que para la propuesta anterior, las partidas, bases de medición y cantidad de obra involucrada son detalladas en la Tabla D.2.8.

## **Apéndice E**

### **Aplicación metodología alternativa para número estructural efectivo**

## E.1. Resultados pista 3

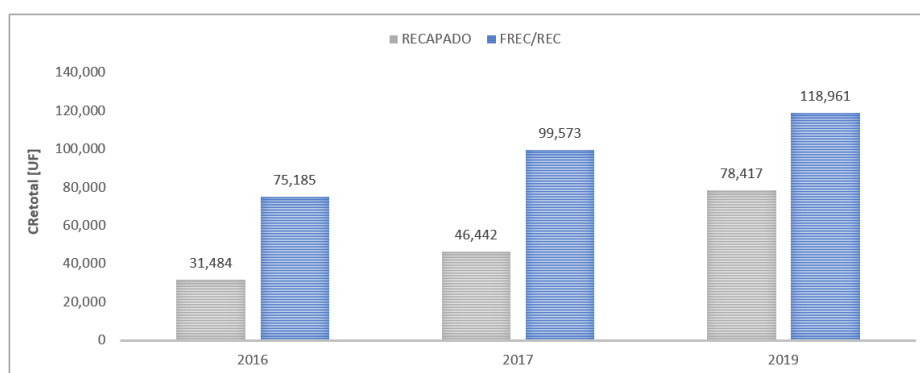
Se presentan los resultados al aplicar la metodología alternativa para la valoración de capacidad estructural utilizando el número estructural efectivo. Solo se incluyen los resultados al realizar una tramificación cada 1 km y no se incluyen los costos indirectos.

**Tabla E.1.1:** Resultados metodología de valorización - Pista 3 (Tramif: 1km).

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	331,216	327,083	338,317	332,278
CRhab [UF]	9,018	71,533	95,441	52,497	113,944
CDem [UF]	700	3,652	4,132	3,322	5,017
CRtotal [UF]	9,718	75,185	99,573	55,819	118,961
Pérdida total [%]	6.20%	22.70%	30.44%	16.50%	35.80%
VP total [UF]	147,048	256,031	227,510	282,498	213,317

En la Figura E.1.1 se presentan los costos de rehabilitación (desempeño y demarcación) para las dos metodologías de valoración. En el análisis solo se consideran los años 2016, 2017 y 2019 ya que estos tienen similar porcentaje de secciones evaluadas, de acuerdo con la información presentada en la Tabla 3.1.2. La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- Recapado: metodología presentada en Sección 2.3.7.1.
- FREC/REC: metodología presentada en Apéndice D.2 (sin considerar el indicador ICE).



**Figura E.1.1:** Comparación de costos de rehabilitación para metodologías de capacidad estructural - Pista 3 (Tram: 1km).

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla E.1.2 se comparan los costos provenientes del indicador NE efectivo en ambas metodologías para valorar la capacidad estructural.

**Tabla E.1.2:** Comparación costos por deflectometría de impacto - Pista 3 (Tramif:1km).

Metodología	Año		
	2016	2017	2019
Recapado [UF]	9,161	11,857	10,622
FREC/REC [UF]	52,805	67,241	55,976
ratio [-]	5.76	5.67	5.27

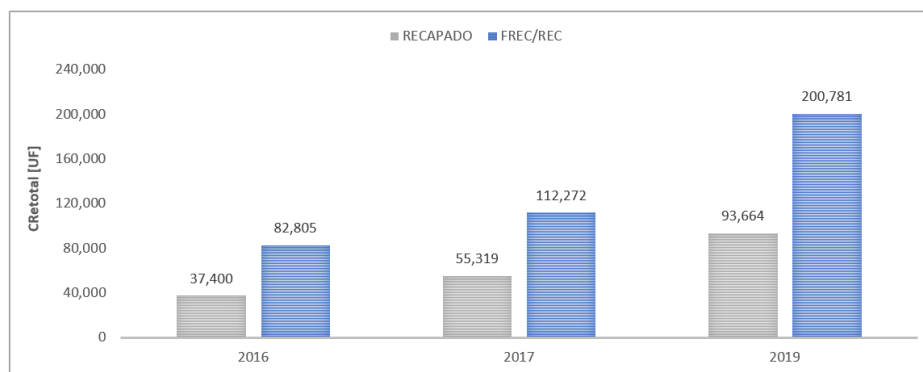
## E.2. Resultados pista 4

Se realiza el mismo procedimiento para la pista 4 y los resultados se presentan en la Tabla E.2.1.

**Tabla E.2.1:** Resultados metodología de valorización - Pista 4 (Tramif:1km).

Parámetro	Año				
	2015	2016	2017	2018	2019
CH [UF]	156,766	320,409	299,418	328,422	307,215
CRehab [UF]	12,197	78,419	107,683	77,366	193,958
CDem [UF]	955	4,386	4,589	4,178	6,823
CRtotal [UF]	13,152	82,805	112,272	81,544	200,781
Pérdida total [%]	8.39%	25.84%	37.50%	24.83%	65.36%
VP total [UF]	143,614	237,604	187,146	246,878	106,434

En la Figura E.2.1 se presentan los costos de rehabilitación (desempeño y demarcación) para las dos metodologías de valorización.



**Figura E.2.1:** Comparación de costos de rehabilitación para metodologías de capacidad estructural - Pista 4 (Tram:1km).

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla E.2.2 se comparan los costos provenientes del indicador NE efectivo en ambas metodologías para valorar la capacidad estructural.

**Tabla E.2.2:** Comparación costos por deflectometría de impacto - Pista 4 (Tramif:1km).

Metodología	Año		
	2016	2017	2019
Recapado [UF]	10,264	13,909	30,682
FREC/REC [UF]	55,748	73,590	145,718
ratio [-]	5.43	5.29	4.75

### **Factores de comparación**

Si se comparan los costos al aplicar ambas metodologías (incluyendo todos los indicadores técnicos), la relación entre los costos totales (sin incluir gastos indirectos) indica que la metodología alternativa es en promedio el doble. La Tabla E.2.3 resume los factores al comparar los costos para cada año, donde:

$$Factor_t = \frac{CR_{total_{FREC/REC}}}{CR_{total_{Recapado_t}}}$$

**Tabla E.2.3:** Factores de comparación de costos totales.

Factor	Año		
	2016	2017	2019
Pista 3	2.4	2.1	1.5
Pista 4	2.2	2.0	2.1
Promedio	2.1		