

## CALIBRACIÓN DEL MODELO DE PROGRESIÓN DE LA RUGOSIDAD (IRI) DE HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Hernán de Solminihaç Tampier\*

Mauricio Salgado Torres\*\*

**Resumen:** la predicción del comportamiento de los pavimentos asfálticos entregada por los modelos desarrollados por el Banco Mundial que están incluidos en el sistema HDM-4 (*Highway Development Management*) debe ajustarse a las condiciones particulares de un país o región mediante factores de calibración. Este trabajo presenta el resultado del análisis que permitió la determinación de los factores de ajuste correspondientes al modelo de rugosidad (IRI) para el caso de Chile y su comparación con los resultados obtenidos de los modelos calibrados de HDM-III (*Highway Design and Maintenance Standards Model*). Para este análisis se utilizó la metodología de "ventanas", que permite construir la curva de evolución del comportamiento de un pavimento típico a partir de datos de deterioro observado a distintas edades, en caminos diferentes con características similares (tránsito, capacidad estructural y condiciones climáticas). Se evaluó la condición de un número importante de caminos (141 tramos testigo), los cuales fueron agrupados en las categorías que representan las configuraciones más comunes de Chile. A través de la comparación de las respectivas curvas de comportamiento de los diferentes escenarios, con las predicciones entregadas por el HDM-4 para cada una de las categorías fue posible encontrar factores de ajuste para que los modelos representaran mejor la condición observada. Finalmente se entregan recomendaciones relacionadas con la utilización de los factores encontrados, que permiten analizar las ventajas que proporciona el emplear el modelo HDM-4 frente a los resultados de rugosidad entregados para los mismos escenarios por el HDM-III; así mismo, se entre-

---

\* Ingeniero civil, Pontificia Universidad Católica de Chile; magister en ciencias y PhD, University of Texas at Austin. Profesor titular, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile.

\*\* Ingeniero civil y especialista en sistemas gerenciales de ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana; magister en ciencias de la ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile; Profesor asistente y jefe de geotecnia, vías y transporte, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

ga un conjunto de sugerencias que pueden ser de utilidad para estudios de calibración similares.

**Abstract:** *The World Bank HDM-4 (Highway Development Management) model, must be adjusted to the specific conditions of a country or region where they are to be used. This work presents the results of the analysis that made possible the determination of the adjustment factors corresponding to the roughness model (IRI) for Chile and offers a comparison of these results with the results obtained from the HDM-III (Highway Design and Maintenance Standards Model) calibrated models. This analysis employed the windows methodology, which in essence allows the generation of a typical pavement's performance curve, based on the deterioration data observed in pavements with different ages from roads that have similar traffic levels, structural capacities and climatic conditions. The study evaluated the condition of 141 test sections and grouped them into categories representing the most common configurations founded in Chile. The calibrations achieved by this study for HDM-III reflects the tendency observed in previous studies, i.e., that the proposed calibration factors offer a high level of reliability for Chile. The HDM-4 calibration factors achieved on this study allowed investigators to minimize the estimated error of the predictions made for the studied cases. However, in some particular cases, investigators detected inconsistencies in the HDM-4 software that would impede its immediate implementation. Finally, this study offers suggestions to those who may need to conduct similar calibration studies.*

## 1. INTRODUCCIÓN

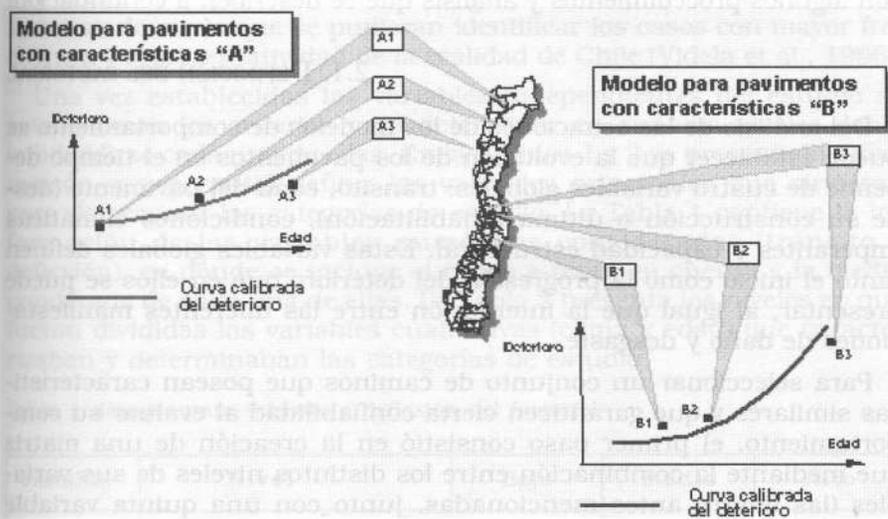
Desde 1984 la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile emprendió un proceso de investigación —en el que la Pontificia Universidad Católica de Chile participa activamente— relacionado con el estudio del comportamiento a lo largo del tiempo de pavimentos asfálticos [De Solminihac, 1998], [Videla, 1992], [Videla et al., 1998]. Dentro de este proceso surgió una nueva etapa para continuar el seguimiento de tramos testigo con pavimentos asfálticos.

Se inició entonces una investigación a fin de desarrollar un análisis comparativo entre los resultados suministrados por los modelos de comportamiento propuestos por el Banco Mundial que se encuentran incluidos en el HDM-III (*Highway Design and Maintenance Standards Model*) y en el HDM-4 (*Highway Development Management*). Para una adecuada comparación de los resultados se consideró una etapa de calibración y adaptación de los modelos a las condiciones particulares de Chile [De Solminihac, Salgado, Hidalgo, 2001].

El propósito del presente trabajo es calibrar el modelo de comportamiento de progresión de la rugosidad (IRI – Índice de Rugosidad Internacional) de pavimentos asfálticos empleado por HDM-4 para las condiciones particulares de Chile y, posteriormente, comparar los resultados obtenidos con las predicciones entregadas por el HDM-III para los mismos casos evaluados.

Con la experiencia de estudios anteriores [Videla, 1992], [Videla et al., 1996] se decidió emplear la metodología de "ventanas". Esta técnica permite lograr las curvas de evolución del deterioro de un pavimento que representen una configuración o escenario típico a partir de la información de la condición y el deterioro observado a diferentes edades de diversos caminos. Los aspectos que más inciden y determinan la definición de una categoría son el tránsito, la capacidad estructural y la condición climática en la que operan. La Figura 1 ilustra el concepto de la metodología de "ventanas".

Figura 1. Metodología de "ventanas"



El otro aspecto por el cual se decidió emplear dicha metodología es que ésta ofrece un espacio de inferencia más amplio y la posibilidad de emplear datos recolectados en diferentes proyectos e investigaciones.

Una etapa importante en el desarrollo de la investigación fue el proceso de recolección de datos, que se llevó a cabo mediante la visita a cada uno de los posibles tramos testigo y la posterior medición del deterioro de aquellas secciones que finalmente fueron seleccionadas. La importancia de visitar los tramos radica en que es posible comprobar en terreno la validez de los datos procesados en el escritorio.

Con la información de deterioro clasificada de acuerdo con las categorías o escenarios típicos presentes en Chile, fueron definidos los tramos tipo que representarían las características generales de cada configuración. Luego se modeló en ambas versiones de HDM, lo que permitió cumplir los dos objetivos planteados: la determinación de los factores de calibración del modelo de progresión de la rugosidad y la comparación de las predicciones suministradas por ambos software debidamente calibrados.

En forma paralela a la modelación en HDM se desarrollaron hojas de cálculo con los correspondientes modelos para analizar la sensibilidad de cada una de las variables en forma individual e independiente, esta herramienta fue de suma utilidad para los análisis y permitió comprender más fácilmente el funcionamiento de los modelos y la interacción entre las variables, llegando incluso a servir para identificar fallas en la modelación del software para el caso específico de HDM-4.

## 2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

La técnica de “ventanas” utilizadas en el estudio está complementada con algunos procedimientos y análisis que se describen a continuación.

### 2.1. DEFINICIÓN DEL FACTORIAL

Del análisis de las ecuaciones de los modelos de comportamiento se puede establecer que la evolución de los pavimentos en el tiempo depende de cuatro variables globales: tránsito, edad del pavimento (desde su construcción o última rehabilitación), condiciones climáticas imperantes y capacidad estructural. Estas variables globales definen tanto el inicio como la progresión del deterioro que en ellos se puede presentar, al igual que la interacción entre las diferentes manifestaciones de daño y desgaste.

Para seleccionar un conjunto de caminos que posean características similares y que garanticen cierta confiabilidad al evaluar su comportamiento, el primer paso consistió en la creación de una matriz que mediante la combinación entre los distintos niveles de sus variables (las cuatro antes mencionadas, junto con una quinta variable encargada de diferenciar las estructuras originales de las estructuras que contarán con algún refuerzo o sobrecarpeta posterior a su construcción) permite definir las distintas categorías de caminos que conformaron el factorial del estudio (Figura 2).

Figura 2. Matriz de resultados de la configuración del factorial del estudio

Calibración del modelo de comportamiento de rugosidad de pavimentos asfálticos para Chile  
Análisis factorial de la investigación

Variables a considerar	Niveles	Clases de niveles
Clima	3	Norte, Centro,
Tránsito	3	Bajo, Medio,
Capacidad estructural	3	Baja, Media,
Edad	3	Inicial, Media,
Tipo de estructura	2	Original,

Estructura original (mezcla o TS)	Tránsito	Bajo						Medio						Alto								
		Deflexión		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		
	Zona climática	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S
Edad	Inicial																					
	Media																					
	Terminal																					

Estructura rehabilitada	Tránsito	Bajo						Medio						Alto								
		Deflexión		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		
	Zona climática	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S	N	C	S
Edad	Inicial																					
	Media																					
	Terminal																					

Para cada categoría se incluyó la mayor cantidad de tramos homogéneos con edades diferentes, a fin de reconstituir curvas de comportamiento con la mayor representatividad en el tiempo. Dentro del estudio se evaluó la condición de 141 tramos testigo.

Una categoría se define entonces como el conjunto de celdas del factorial con similares características de clima, estructura y tránsito. Solamente aquellas categorías que contaban con suficientes tramos distribuidos en diferentes edades a lo largo de la vida útil del pavimento fueron las finalmente consideradas para efectos del análisis.

El objetivo de definir el factorial era identificar categorías que representaran escenarios típicos de caminos con pavimento flexible en Chile y poder clasificar los tramos testigo en cada una de las celdas del factorial, de modo que se pudieran identificar los casos con mayor frecuencia y representatividad de la realidad de Chile [Videla et al., 1996].

Una vez establecidas las variables independientes del estudio se establecieron los criterios para determinar en cuántos niveles debía subdividirse cada una de ellas. En las Tablas 1 y 2 se presenta la información que permitió definir las variables principales que sirvieron para determinar las categorías de estudio. La Tabla 1 contiene la información de las variables numéricas consideradas (tránsito y deflexión), en donde se incluye el rango a tener en cuenta y la media ponderada de cada una de ellas. La Tabla 2 presenta los niveles en que fueron divididas las variables cualitativas (clima y edad) que caracterizaban y determinaban las categorías de estudio.

Tabla 1. Rangos para tránsito y deflexión del factorial

Variable	Nivel	Bajo	Medio	Alto
Tránsito	Rango total (Ejes Equivalentes/día)	0-415	415-948	948-6773
	Media Ponderada (Ejes Equivalentes/día)	199	569	2271
Deflexión	Rango considerado (mm)	0,12-0,33	0,34-0,55	0,57-0,67
	Media ponderada (mm)	0,195	0,463	0,629

Fuente: los autores

Tabla 2. Niveles para clima y edad

Clima	Norte de Chile (clima cálido y seco)	Centro de Chile (clima templado)	Sur de Chile (clima frío y húmedo)
Edad	Inicial	Medio	Terminal
	0 - 4 años	5 - 11 años	12 - 30 años

Fuente: los autores

A partir de la definición de un factorial compuesto por la combinación de las variables mencionadas, se procedió a seleccionar aquellas combinaciones o categorías que garantizaban un número aceptable de tramos testigo, en donde los datos de los mencionados tramos cumplieran con un nivel mínimo y adecuado de confiabilidad. Las categorías consideradas para este estudio se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Categorías de estudio en función de la zona climática, el tránsito y la deflexión

Código	Tipo de superficie	Zona climática	Tránsito	Deflexión
01 A	Doble tratamiento superficial	Norte	Bajo	Media
02 A	Doble tratamiento superficial	Sur	Bajo	Media
03 A	Doble tratamiento superficial	Centro	Bajo	Alta
04 A	Doble tratamiento superficial	Sur	Bajo	Alta
05 A	Doble tratamiento superficial	Centro	Medio	Alta
06 A	Doble tratamiento superficial	Sur	Medio	Alta
07 A	Con sobrecarpeta asfáltica	Sur	Alto	Baja
08 A	Con sobrecarpeta asfáltica	Norte	Alto	Media
09 B	Doble tratamiento superficial	Centro	Bajo	Media
10 B	Mezcla asfáltica	Norte	Medio	Baja
11 B	Doble tratamiento superficial	Centro	Medio	Media
12 B	Doble tratamiento superficial	Sur	Medio	Media
13 B	Con sobrecarpeta asfáltica	Norte	Alto	Baja
14 B	Con sobrecarpeta asfáltica	Sur	Alto	Media

Fuente: los autores

Una vez definido el factorial del estudio se estableció un procedimiento de selección de tramos por categoría que debía compatibilizar simultáneamente dos criterios:

- contar con un número suficiente de tramos por celda para disponer de una cantidad mínima de datos de deterioro a efectos de lograr una adecuada calibración de los modelos de predicción de comportamiento;
- la amplitud de los rangos debe ser en lo posible lo suficientemente pequeña, para asegurar la mayor similitud y homogeneidad de las

características para los distintos tipos de pavimento a fin de asegurar una mayor confiabilidad de la calibración.

Aunque se buscó satisfacer a plenitud los dos criterios anteriores, de los 141 tramos iniciales solamente se utilizaron los 97 que pertenecían a las categorías seleccionadas y cuyos valores de tránsito y deflexión estaban incluidos dentro del rango especificado para estas variables.

## 2.2. MEDICIÓN DE DETERIOROS DE TRAMOS TESTIGO

Para recolectar la información de deterioro de las secciones fue necesario establecer una metodología de medición que definiera desde la cantidad de muestras a ser medidas, hasta la forma como se recogerían los datos en terreno. Con este fin se realizaron diversos análisis estadísticos que, basados en la información de deterioro disponible y en los antecedentes de proyectos anteriores, permitieron establecer el método de muestreo más representativo.

El objetivo principal de la metodología de medición fue obtener un número de muestras que permitiera estimar el deterioro promedio con una confiabilidad aceptable y un rendimiento óptimo.

Una vez definidos los procedimientos de medición y trabajando en coordinación con el Laboratorio Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile, se recorrió la totalidad de los tramos testigo del proyecto en un periodo cercano a los siete meses y se logró medir y establecer el estado y las condiciones de cada uno de los caminos seleccionados. En particular los datos de rugosidad se obtuvieron a través de la utilización de un perfilómetro óptico de alto rendimiento.

## 2.3. MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CATEGORÍAS DE ESTUDIO

Con la información del deterioro real de los tramos testigo procesada se alimentaron los modelos HDM con los datos de entrada correspondientes y se simuló el comportamiento del pavimento en el tiempo para cada una de las categorías de estudio.

A continuación se describen los pasos y las consideraciones más importantes que se tuvieron en cuenta para la modelación de las diferentes categorías de estudio:

- Determinación para cada categoría de un tramo tipo definido por los valores medios por kilómetro de los datos de inspección visual, auscultación continua, tránsito y clima. En el caso de las variables y datos de entrada más sensibles el valor medio fue calculado en función de la longitud del tramo.
- Alimentación de los modelos con los parámetros de entrada y valores medios de las variables que caracterizan a los tramos tipo.
- Eliminación y rechazo de datos anómalos de medición de deterioro que, de acuerdo con la experiencia, aparecían notoriamente desviados del comportamiento normal (por ejemplo, valores muy altos de

- deterioro a edades tempranas o deterioros muy bajos a edades avanzadas).
- Modelación preliminar de la rugosidad considerando valores estimados para la rugosidad inicial (IRI<sub>0</sub>), de modo que a partir de un proceso iterativo se revisaba y corregía este valor hasta encontrar un adecuado ajuste del modelo.

En forma simultánea a la modelación se desarrollaron hojas de cálculo que incluían los respectivos modelos de comportamiento. Esta herramienta sirvió para entender mejor la sensibilidad de cada una de las variables que intervienen en los modelos, además de agilizar y simplificar los procesos iterativos que permitieran identificar los valores óptimos para los factores de ajuste.

Es importante mencionar que la modelación y posterior calibración se efectuó usando HDM-III y HDM-4 directamente, las hojas de cálculo solamente fueron empleadas como herramienta de soporte para la comprobación de resultados y el chequeo de irregularidades detectadas.

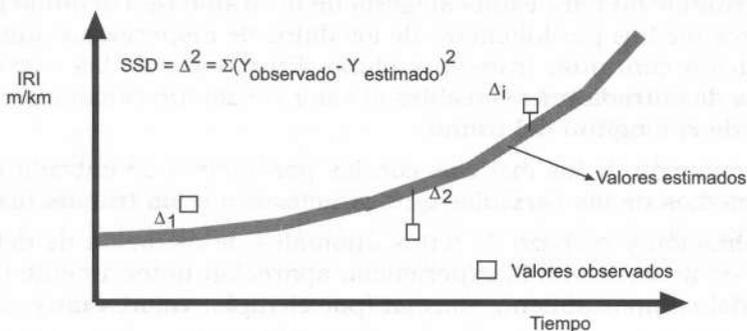
#### 2.4. CALIBRACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS MODELOS

A partir de los resultados alcanzados con las modelaciones se lograron predicciones de comportamiento que permitieron comparar contra los datos medidos en los tramos testigo; de esta manera se evaluó el grado de similitud de estas predicciones con la realidad.

El procedimiento propuesto para la calibración estadística de los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos se basa en la determinación de factores para lograr un mejor ajuste de las curvas de deterioro simulado a los datos de comportamiento real, mediante la minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados [Videla, 1992].

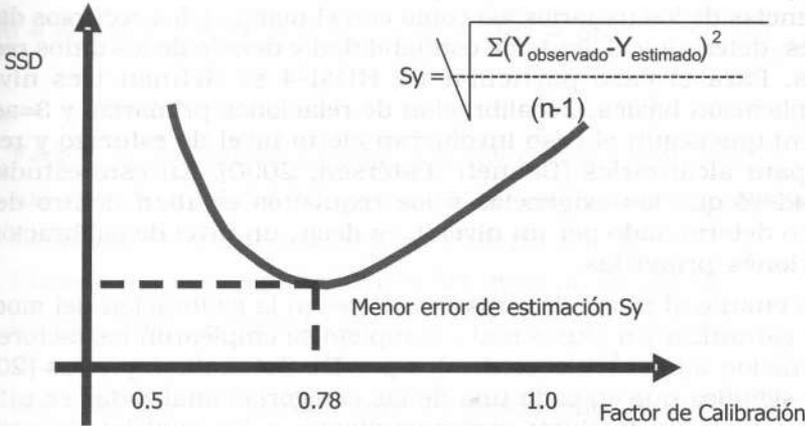
La Figura 3 presenta una curva típica de comportamiento del modelo de ahuellamiento medio y sobre ella se encuentran localizados los datos observados y la curva obtenida a partir de las predicciones del modelo. El mejor ajuste consiste en minimizar las diferencias de modo que se logre una representación fiel y real del comportamiento en el tiempo.

Figura 3. Minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre valores estimados y medidos



Minimizar el valor de SSD conlleva una reducción del error medio de estimación ( $S_y$ ) que permite encontrar el factor de calibración que asegura el mejor ajuste de la curva de deterioro y por ende la calibración del modelo de comportamiento analizado [Kannemeyer, Visser, 1996], tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Suma de los cuadrados de las diferencias de los datos predichos y medidos contra el valor de los factores  $k_{gp}$



### 2.5. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE IRIÓ ÓPTIMO

Debido al grado de influencia del valor inicial de rugosidad (IRI<sub>0</sub>) dentro de los resultados obtenidos en el modelo de comportamiento de la progresión de la rugosidad, previo al proceso de calibración, se llevó a cabo un proceso iterativo para determinar el valor óptimo de IRI<sub>0</sub> a partir de los datos predichos y observados en forma similar al procedimiento sugerido para la determinación de los factores de calibración óptimos.

Los antecedentes y la experiencia fueron el punto de partida para la identificación del valor de rugosidad inicial; para el caso de las mezclas asfálticas (pavimentos nuevos o rehabilitados) sus niveles de IRI<sub>0</sub> se distribuyen en un rango entre 0,8 m/km (muy bueno) a 2,2 m/km (construcción defectuosa), con un valor medio alrededor de 1,2 m/km. En el caso de los dobles tratamientos, el valor de IRI<sub>0</sub> se encuentra en un rango comprendido entre 2,0 m/km (muy bueno) a 2,7 m/km (construcción defectuosa), con un valor medio alrededor de 2,3 m/km.

### 3. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE PROGRESIÓN DE LA RUGOSIDAD DE HDM

En forma paralela al proceso anterior se determinaron los factores de calibración correspondientes a los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos de HDM-III y HDM-4, enfatizando, sin embargo,

en el análisis del HDM-4 debido a que su revisión y calibración eran prioritarias para propiciar su utilización masiva.

### 3.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE PROGRESIÓN DE LA RUGOSIDAD DE HDM-4

El nivel de calibración de los modelos de comportamiento está definido por el alcance del estudio que, de acuerdo con las necesidades y exigencias de los usuarios así como con el tiempo y los recursos disponibles, determina el grado de confiabilidad y detalle de los datos requeridos. Para el caso particular de HDM-4 se definen tres niveles (1=aplicación básica, 2=calibración de relaciones primarias y 3=adaptación) que según el caso involucran cierto nivel de esfuerzo y recursos para alcanzarlos [Bennett, Paterson, 2000]. En este estudio se consideró que las exigencias y los requisitos estaban dentro de un marco determinado por un nivel 2, es decir, un nivel de calibración de relaciones primarias.

En cuanto al efecto de otros deterioros en la calibración del modelo, para garantizar un ajuste real y completo se emplearon los factores de calibración ajustados encontrados por De Solminihac y otros [2001]. Esto significa que en cada una de las categorías analizadas se utilizaron los factores de ajuste correspondientes a los modelos de agrietamiento, baches, pérdida de áridos y ahuellamiento encontrados para HDM de acuerdo con las condiciones particulares de Chile.

Otro aspecto importante es la determinación del factor  $k_{gm}$  (factor de calibración medioambiental de la rugosidad), el cual introduce el efecto de las condiciones climáticas dentro del modelo. Los valores más adecuados para el factor medio ambiental de la rugosidad fueron establecidos en estudios anteriores [Videla, 1992], [Videla et al., 1996], los cuales identificaron cuatro grandes zonas climáticas en el país (norte, centro, sur y extremo sur) para las que respectivamente se definieron valores del coeficiente medioambiental ( $m$ ) y los correspondientes parámetros de temperatura, humedad y precipitación. Sin embargo, por concentrar la mayor cantidad de kilómetros de caminos pavimentados con asfalto, sólo se consideraron en este estudio tres de las cuatro zonas del país. La Tabla 4 presenta los valores adoptados para  $m$  y  $k_{gm}$  para las tres zonas consideradas de Chile.

Tabla 4. Valores del coeficiente medioambiental  $m$  y factor de calibración  $k_{gm}$  adoptados para las modelaciones de HDM-4

Zona climática	Coficiente medio ambiental $m$	Factor de calibración $k_{gm}$
Norte	0,01	0,43
Centro	0,03	1,30
Sur	0,04	1,74

Fuente: los autores

Una vez definido el contexto de calibración especificado para HDM-4, se procedió a efectuar las respectivas modelaciones del comportamiento de los catorce tramos tipo que representan las categorías de estudio de la investigación, a través de un proceso iterativo que permitiera establecer el valor óptimo para el factor de calibración  $k_{gp}$  del modelo de progresión de la rugosidad mostrado a continuación: [Odoki, Kerali, 2000]

$$\Delta RI = K_{gp} (\Delta RIs + \Delta RIc + \Delta RIv + \Delta RIr + \Delta RIt) + \Delta RIe \quad (1)$$

donde:

- $K_{gp}$ : Factor de calibración para la progresión de la rugosidad
- $\Delta RI$ : Incremento total del IRI en m/km durante el año o temporada
- $\Delta RIs$ : Componente estructural del incremento del IRI
- $\Delta RIc$ : Componente del agrietamiento del incremento del IRI
- $\Delta RIr$ : Componente de ahuellamiento del incremento del IRI
- $\Delta RIt$ : Componente de baches del incremento del IRI
- $\Delta RIe$ : Componente medioambiental del incremento del IRI

### 3.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE PROGRESIÓN DE LA RUGOSIDAD DE HDM-III

En forma similar y paralela se trabajó con el modelo HDM-III en donde también se identificaron los correspondientes valores óptimos de los factores de calibración del modelo de progresión de la rugosidad para cada una de las catorce categorías que componen este estudio.

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS EN LA CALIBRACIÓN POR CATEGORÍAS

Mediante un proceso iterativo se encontró el factor de calibración para el modelo de progresión de la rugosidad ( $k_{gp}$ ) de cada una de las categorías de estudio, así como los respectivos errores de estimación ( $S_y$ ) encontrados para cada caso. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores óptimos recomendados de  $k_{gp}$  encontrados para las categorías de estudio mediante modelaciones efectuadas en HDM-III y HDM-4

Categoría	Tipo de estructura	Zona climática	Nivel de tránsito	Nivel de deflexión	Modelo de rugosidad de HDM-III			Modelo de rugosidad de HDM-4		
					IRI <sub>o</sub>	$k_{gp}$	$S_y$	IRI <sub>o</sub>	$k_{gp}$	$S_y$
1A	DTA	Norte	Bajo	Media	2,70	1,00	0,15	2,70	1,90	0,14
2A	DTA	Sur	Bajo	Media	2,00	0,70	1,86	2,00	0,10	12,34
3A	DTA	Centro	Bajo	Alta	2,50	1,00	0,61	2,50	0,10	0,61
4A	DTA	Sur	Bajo	Alta	2,00	1,00	0,73	2,00	0,10	9,74
5A	DTA	Centro	Medio	Alta	2,20	1,62	0,45	2,00	1,65	0,51
6A	DTA	Sur	Medio	Alta	1,90	0,50	1,22	2,00	0,10	12,07
9B	DTA	Centro	Bajo	Media	2,50	1,00	0,39	2,30	0,30	0,51
11B	DTA	Centro	Medio	Media	2,80	2,30	0,27	2,70	0,90	0,38
12B	DTA	Sur	Medio	Media	2,50	1,30	0,44	2,00	0,10	10,96
10B	Mezcla Asfáltica	Norte	Medio	Baja	1,40	1,00	0,19	1,60	0,10	0,08
7A	Sobrecarpeta asfáltica	Sur	Alto	Baja	1,20	4,00	0,73	0,80	0,10	8,21
8A	Sobrecarpeta asfáltica	Norte	Alto	Media	1,20	5,20	0,55	1,20	4,20	0,54
13B	Sobrecarpeta asfáltica	Norte	Alto	Baja	1,50	0,20	0,59	1,80	0,10	0,63
14B	Sobrecarpeta asfáltica	Sur	Alto	Media	1,40	0,50	0,72	0,80	0,10	1,52

DTA: Doble Tratamiento Asfáltico.

Fuente: los autores

Como se mencionó, debido a la fuerte incidencia del valor de la rugosidad inicial (IRI<sub>o</sub>) en el alcance de una calibración óptima —y como consecuencia—, en la determinación del valor óptimo de  $k_{gp}$  se presenta asociado a cada valor óptimo el respectivo valor de IRI<sub>o</sub> que representa la condición inicial del pavimento bajo la cual se realizó la calibración del modelo.

Un aspecto importante a mencionar es el relacionado con el error de estimación; en la Tabla 5 se observa que para el caso específico de los factores de calibración de la zona sur (climas fríos) este valor resulta muy elevado, lo que tal vez podría explicarse si se considera que las predicciones de IRI suministradas por el HDM-4 a partir del quinto o sexto año empiezan a ser muy diferentes con respecto a los datos observados o a la tendencia normal de crecimiento de la curva de progresión de la rugosidad que para un caso similar entrega HDM-III.

En este sentido se revisaron las posibles causas de esta irregularidad pero fue imposible lograr una explicación para estos, más aun cuando los modelos de comportamiento no presentan problema, hecho que

se comprobó con las modelaciones efectuadas en hojas de cálculo en donde el comportamiento simulado seguía una tendencia similar a la observada o a la predicha por HDM-III.

#### 4.2. DETERMINACIÓN DE FACTORES DE CALIBRACIÓN MEDIOS GLOBALES

Al organizar y clasificar los valores contenidos en la Tabla 5 con respecto a las variables y niveles principales del factorial se encontraron factores promedios globales. Estos valores se identificaron con la intención de suministrar pautas para la determinación de factores de calibración para los casos aislados que escapaban al cubrimiento de las categorías del estudio. Por otro lado, se pretendía identificar la incidencia de las variables que caracterizan los distintos escenarios y las posibles tendencias de los valores promedios encontrados. En la Tabla 7 se presentan los valores de  $IRI_o$  y  $k_{gp}$  que se obtuvieron para HDM-III y HDM-4.

Tabla 7. Factores medios globales de progresión de la rugosidad de pavimentos asfálticos  $k_{gp}$

Variable del factorial	Nivel del factorial	IRI <sub>o</sub>				Factor de Calibración $k_{gp}$			
		Dobles tratamientos		Mezclas asfálticas		Dobles tratamientos		Mezclas asfálticas	
		HDM-III	HDM-4	HDM-III	HDM-4	HDM-III	HDM-4	HDM-III	HDM-4
Zona	Norte	2,70	2,70	1,37	1,53	1,00	1,90	2,13	1,47
	Centro	2,50	2,38	s/d	s/d	1,48	0,74	s/d	s/
	Sur	2,10	2,00	1,30	0,80	0,88	0,10	2,25	0,10
Tránsito	Bajo	2,34	2,30	s/d	s/d	0,94	0,50	s/d	s/d
	Medio	2,35	2,18	1,40	1,60	1,43	0,69	1,00	0,10
	Alto	s/d	s/d	1,33	1,15	s/d	s/d	2,48	1,13
Deflexión	Baja	s/d	s/d	1,37	1,40	s/d	s/d	1,73	0,10
	Media	2,50	2,34	1,30	1,00	1,26	0,66	2,85	2,15
	Alta	2,15	2,13	s/d	s/d	1,03	0,49	s/d	s/d
Factor medio global		2,34	2,24	1,34	1,24	1,16	0,58	2,18	0,92

s/d: sin datos para esa combinación

Fuente: los autores

#### 4.3. RELACIÓN ENTRE EL FACTOR DE CALIBRACIÓN $k_{gp}$ Y EL VALOR DE RUGOSIDAD INICIAL $IRI_o$

La calibración del modelo de progresión de la rugosidad no está limitada exclusivamente a la determinación del factor de ajuste  $k_{gp}$ , también depende del valor de rugosidad inicial  $IRI_o$  que se adopte. Por este motivo se sugirió efectuar un análisis que permitiera lograr, además

de un valor óptimo de  $k_{gp}$ , el correspondiente valor de IRlo para una mayor representatividad de la situación a modelar.

Fue así como se logró establecer que la relación existente obedece a una función de la forma  $k_{gp} = -a \cdot IRlo + b$  siendo a y b dos coeficientes propios de la categoría analizada. En la Tabla 8 se enumeran las respectivas relaciones entre  $k_{gp}$  e IRlo para cada una de las categorías que permiten ampliar el cubrimiento de la calibración. El rango dentro del cual es válido este ejercicio depende del tipo de superficie que sea evaluada.

Tabla 8. Ecuaciones para la determinación del valor óptimo de  $k_{gp}$  en función del valor IRlo ( $k_{gp} = -a \cdot IRlo + b$ )

Categoría	Tipo de estructura	HDM-III			HDM-4				
		Rango IRlo	A	b	b/a	Rango IRlo	a	b	b/a
1 A	DTA	2,0-2,8	-5,29	15,37	-2,91	2,0-2,8	-4,00	12,70	-3,18
2 A	DTA	1,8-2,4	-0,47	1,29	-2,73	2,0	s/d	s/d	s/d
3 A	DTA	2,0-2,7	-3,08	8,68	-2,82	2,0-2,7	-2,50	6,35	-2,54
4 A	DTA	1,8-2,1	-4,64	10,15	-2,19	2,0	s/d	s/d	s/d
5 A	DTA	2,0-2,7	-1,82	5,64	-3,10	2,0-2,7	-2,17	5,98	-2,76
6 A	DTA	1,7-1,9	-1,00	2,00	-2,00	2,0	s/d	s/d	s/d
9B	DTA	2,0-2,5	-12,00	30,40	-2,53	2,0-2,5	-6,67	15,63	-2,34
11B	DTA	2,0-2,7	-6,42	20,12	-3,14	2,0-2,8	-3,67	10,83	-2,95
12B	DTA	2,0-2,7	-5,57	15,23	-2,73	2,0	s/d	s/d	s/d
<b>Valores promedio para dobles tratamientos asfálticos</b>		<b>1,8-2,8</b>	<b>-4,48</b>	<b>12,10</b>	<b>-2,68</b>	<b>2,0-2,8</b>	<b>-3,80</b>	<b>10,30</b>	<b>-2,76</b>
10B	Mezcla asfáltica	0,8-1,5	-11,83	17,86	-1,51	0,8-1,8	-5,25	8,50	-1,62
7 A	Sobrecarpea asfáltica	0,8-1,8	-5,87	11,08	-1,89	2,0	s/d	s/d	s/d
8 A	Sobrecarpea asfáltica	0,8-1,8	-7,19	13,83	-1,92	0,8-1,4	-4,00	9,00	-2,25
13B	Sobrecarpea asfáltica	0,8-1,5	-13,80	20,86	-1,51	0,8-1,8	-2,33	4,30	-1,84
14B	Sobrecarpea asfáltica	0,8-1,3	-20,76	28,50	-1,37	2,0	s/d	s/d	s/d
<b>Valores promedio para estructuras nuevas y rehabilitadas</b>		<b>0,8-1,8</b>	<b>-11,9</b>	<b>18,4</b>	<b>-1,60</b>	<b>0,8-1,8</b>	<b>-3,90</b>	<b>7,30</b>	<b>-1,90</b>

s/d: sin dato; debido a la escasa confiabilidad obtenida para los tramos en climas fríos no se entregó un valor.

Fuente: los autores

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para desarrollar un proyecto de calibración de los modelos de comportamiento del HDM-4 adecuado a las condiciones locales de un país o región existe un método probado con relativo éxito que permitiría llevar a cabo este proceso en un tiempo no muy extenso y con un consumo de recursos bastante razonable.

Aunque se puede realizar un proceso de calibración de los modelos de comportamiento incluidos en HDM-4 en un periodo relativamente corto para proyectos de esta naturaleza (entre 12 y 18 meses), esta duración dependerá de la disponibilidad de información, la facilidad para llevar a cabo mediciones del deterioro y el número de escenarios a evaluar.

En síntesis, como los resultados alcanzados con este estudio son bastante aceptables para la mayoría de escenarios evaluados, es posible concluir que la metodología de las "ventanas" es una buena alternativa para adelantar este tipo de proyectos.

Otro aspecto a destacar es el relacionado con la obtención de valores medios globales para los factores de ajuste por zonas climáticas, con los cuales sea posible dar cobertura a aquellos escenarios que bien por ausencia de datos o por ser excepcionales, no fue posible para ellos encontrar los factores de calibración propios. Si bien es cierto que el valor que se aplicaría no es muy exacto, puede servir de guía para lograr un mejor ajuste de los modelos a la situación que se requiere presentar.

De otra parte, con la investigación se ratificó la hipótesis según la cual el valor de IRI inicial tiene gran incidencia en el resultado final del proceso de calibración del modelo de rugosidad. Luego para el caso particular del modelo de progresión de la rugosidad, es preciso garantizar que los valores de IRlo se acercan lo más posible a la condición que tenía el pavimento evaluado en el momento de su puesta en funcionamiento.

Como recomendaciones generales es posible señalar las siguientes:

- Se recomienda seguir investigando las variables que inciden en el modelo de rugosidad y en otros modelos de HDM-4, de modo que se logre detectar la causa de las irregularidades encontradas en la modelación de tramos localizados en climas fríos.
- Debido a la influencia del valor de rugosidad inicial en las tendencias que simula el HDM-4, se recomienda crear bases de datos que registren estos valores para distintos tipos de estructuras sujetas a condiciones de operación diversas, de modo que se puedan efectuar calibraciones con valores IRlo más certeras y confiables.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile por el apoyo técnico y económico otorgado a través del proyecto de investigación "Seguimiento para la calibración de modelos de deterioro de pavimentos asfálticos" realizado por la Pontificia Universidad Católica de Chile.

## REFERENCIAS

- BENNETT, C. R., D. O. PATERSON (2000), *A Guide to Calibration and Adaptation of HDM-4*. The Highway Development and Management Series, Vol. 5, Association Mondiale de la Route, AIPCR.
- DE SOLMINIHAC, H. (1998), *Gestión de infraestructura vial*, Santiago de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DE SOLMINIHAC, H. (1989), *Plan de control y seguimiento de pavimentos asfáltico*, Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DE SOLMINIHAC, H., M., SALGADO, P., HIDALGO (2001), *Estudio seguimiento para la calibración de modelos de deterioro de pavimentos asfálticos*, Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- KANNEMEYER, L. A. T., VISSER (1996), *Calibration of HDM-III Performance Models for Use in Pavement Management of South African National Roads*, Washington D.C., Transportation Research Record 1508, Transportation Research Board, National Research Council.
- ODOKI, J. B., H. G. R. KERALI (2000), *Analytical Framework and Model Descriptions*. The Highway Development and Management Series. Vol. 4, Association Mondiale de la Route, AIPCR.
- VIDELA, C. (1992), *Estudio para la evaluación de la eficacia de la conservación en pavimentos asfálticos. Sistema de gestión de pavimentos UIMP*, Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- VIDELA, C., H., DE SOLMINIHAC, R. GAETE, M. BUSTOS (1996), *Ajuste de factores de calibración para ampliar modelos de deterioro de pavimentos asfálticos*. Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile.