

CALIBRACION DEL MODELO DE PROGRESION DE LA RUGOSIDAD (IRI) PARA PAVIMENTOS ASFALTICOS EN HDM-4 A LAS CONDICIONES DE CHILE

CALIBRATION OF THE ROUGHNESS (IRI) PROGRESSION MODEL FOR ASPHALT PAVEMENTS IN HDM-4 TO THE CHILEAN CONDITIONS

Por / By **Hernán de Solminihac, Mauricio Salgado, Priscila Hidalgo, Miguel Valdés**

Resumen

El modelo HDM-4 (Highway Development Management) usado para la evaluación técnica y económica de caminos, puede ser ajustado a las condiciones específicas de un país o región donde será utilizado. Este trabajo presenta los resultados del análisis que hizo posible la determinación de factores de ajuste correspondientes al modelo de rugosidad (IRI), y su comparación con los resultados obtenidos de los modelos calibrados de HDM-III (versión previa de HDM-4) para Chile. Para este análisis se utilizó la metodología de “ventanas”, que fundamentalmente 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 similar nivel de tránsito, capacidad estructural y condiciones climáticas. Esta investigación confirma la utilidad de emplear la metodología “ventanas” en proyectos de calibración de modelos de comportamiento de pavimentos. Los factores de calibración obtenidos en este estudio permitieron a los investigadores minimizar el error estimado de las predicciones hechas para los casos de estudio. Sin embargo, en climas fríos, los investigadores detectaron inconsistencias en el software HDM-4 versión 1.1 que impedirían su implementación inmediata. Finalmente, este estudio entrega sugerencias para quienes puedan necesitar llevar a cabo un estudio de calibración similar.

Palabras clave: Calibración, rugosidad, IRI, HDM-4, HDM-III, deterioro, pavimentos asfálticos.

Abstract

The HDM-4 (Highway Development Management) model used for the economic and technical evaluation of roads 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), and offers a comparison of these results to those obtained from the HDM-III (previous version of HDM-4) calibrated models for Chile. 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. This research confirms the utility of employing the "windows" methodology in calibrating pavement performance model projects. The HDM-4 calibration factors achieved on this study allowed researchers to minimize the estimated error of the predictions made for the studied cases. However, in cold climates, researchers detected inconsistencies in the HDM-4 software version 1.1 that would impede its immediate implementation. Finally, this study offers suggestions to those who may need to conduct similar calibration studies.

Keywords: Calibration, roughness, IRI, HDM-4, HDM-III, distress, asphalt pavement.

1. INTRODUCCION

Desde 1984 la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile emprendió un proceso de investigación, relacionado con el estudio del comportamiento de pavimentos asfálticos a lo largo del tiempo, en el que la Pontificia Universidad Católica de Chile ha participado activamente (de Solminihac et al., 1989; Videla et al., 1992; Videla et al., 1996). Es así como dentro de este proceso, surgió una nueva etapa que planteó continuar el seguimiento de tramos testigo de pavimentos de asfalto, mediante el estudio denominado “Seguimiento para la Calibración de Pavimentos Asfálticos” (de Solminihac et al, 2001), desarrollado por DICTUC S.A para la Unidad de Gestión Vial de la Dirección Nacional de Vialidad.

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



Considerando la experiencia obtenida en estudios anteriores (Videla et al., 1992 y Videla et al., 1996), se decidió emplear la metodología de “ventanas”. Esta técnica permite construir 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 deterioro observado a diferentes edades de caminos diferentes. Los aspectos que inciden y determinan principalmente 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”.

El otro motivo por el cual se decidió emplear esta metodología en el desarrollo de la investigación, es que ofrece la posibilidad de contar con un espacio de inferencia más amplio y de emplear datos recolectados en diferentes proyectos e investigaciones.

Una etapa importante en el desarrollo de la investigación consistió en el proceso de recolección de datos, el cual se llevó a cabo visitando cada uno de los tramos factibles y midiendo los deterioros de los tramos finalmente seleccionados. 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 a las categorías o escenarios típicos presentes en Chile correspondiente a los tramos testigo seleccionados, se definió los tramos tipo que representarían las características generales de cada configuración. Luego se modelaron 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 realizaron análisis de sensibilidad de cada una de las variables en forma individual e independiente. Este análisis fue de suma utilidad ya que 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, en su versión 1.1, que fue la empleada en este estudio.

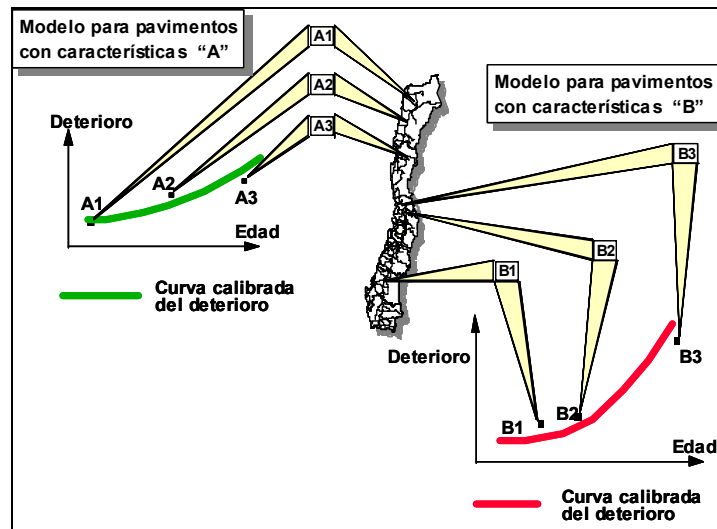


Figura 1. Metodología de las “Ventanas”

2. METODOLOGIA DE CALIBRACION

Para el desarrollo del estudio se decidió seguir una metodología, que como se ha mencionado, está basada en la técnica de “ventanas” y 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 fundamentalmente de cuatro variables globales: tránsito, edad del pavimento (desde su construcción o última rehabilitación), condiciones climáticas imperantes y capacidad estructural, las cuales definen tanto el inicio como la progresión del deterioro que en ellos se puede presentar, junto con la interacción entre las diferentes manifestaciones de daño y desgaste.



Para seleccionar un conjunto de caminos que posean características similares, 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 recapadas) permite definir las distintas categorías de caminos que conformaron el *factorial del estudio*, el cual es mostrado en la Figura 2.

Para cada categoría se trató de incluir la mayor cantidad de tramos homogéneos con edades lo más diferentes posible, a fin de reconstituir curvas de comportamiento con la mayor representatividad en el tiempo. Dentro del estudio fue posible evaluar la condición de un número importante de caminos (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 de la presente investigación.

Análisis Factorial de la Investigación																						
VARIABLES A CONSIDERAR	NIVELES	CLASES DE NIVELES																				
clima	3	Norte, Centro, Sur																				
tránsito	3	Bajo, Medio, Alto																				
capacidad estructural	3	Baja, Media, Alta																				
edad	3	Inicial, Media, Terminal																				
tipo de estructura	2	Original (Mezcla o Tratamiento), Recapada																				
Estructura Original (mezcla o TS)																						
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 Recapada																						
Estructura Recapada	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																					

Figura 2. Configuración del factorial del estudio

El objetivo perseguido con la definición del factorial es identificar categorías que representen escenarios típicos de caminos pavimentados con asfalto en Chile, y poder clasificar los tramos testigo en cada una de las celdas del factorial, de modo que se puedan 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 que permitieron determinar en cuántos niveles debía subdividirse cada una de ellas. En la Tabla 1 se muestra la información usada para definir las variables principales que sirvieron para determinar las categorías de estudio.

Tabla 1. Variables del factorial (Videla et al., 1996)

VARIABLES A CONSIDERAR	NIVELES	CLASES DE NIVELES
Clima	3	Norte, Centro, Sur
Tránsito	3	Bajo, Medio, Alto
Capacidad Estructural.	3	Baja, Media, Alta
Edad	3	Inicial, Media, Terminal
Tipo estructura	2	Original (Mezcla o Tratamiento Superficial), Recapada

A partir de la definición de una matriz o factorial compuesto por la combinación de las variables antes mencionadas, se seleccionaron aquellas combinaciones o categorías que garantizaran 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 2.



Tabla 2. Categorías de estudio

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	Recapado Asfáltico	Sur	Alto	Baja
08 A	Recapado Asfáltico	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	Recapado Asfáltico	Norte	Alto	Baja
14 B	Recapado Asfáltico	Sur	Alto	Media

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 pequeño, para asegurar la mayor similitud y homogeneidad de las características para los distintos tipos de pavimento, y con ello asegurar una mayor confiabilidad de la calibración.

Aunque se buscó satisfacer a plenitud los dos criterios anteriores, de los 141 tramos iniciales fueron utilizados solamente 97 tramos que pertenecían a las categorías seleccionadas y que sus 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 los tramos, fue necesario establecer una metodología de medición que definiera desde la cantidad de muestras que debían ser medidas, hasta la forma como se recogerían en terreno los datos de un tramo. 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 recorrieron la totalidad de los tramos testigo del proyecto en un periodo cercano a los 7 meses y se lograron 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

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

A continuación se describen los pasos y 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 diferentes 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 a 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 (IRIo), 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 realizaron análisis de sensibilidad de cada una de las variables que intervienen en los modelos, con lo que se agilizó y simplificó 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. Los análisis de sensibilidad realizados en hojas de cálculo solamente fueron empleados como herramienta de soporte para la comprobación de resultados y 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 luego se compararon contra los datos medidos en los tramos testigo, permitiendo de esta manera evaluar 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 en la presente investigación, se basa principalmente en la determinación de factores que permitan 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 (SSD, Sum of Squared Differences); (Videla et al., 1992).

La Figura 3 presenta una curva típica del modelo de comportamiento 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 la representación más fiel y real del comportamiento en el tiempo.

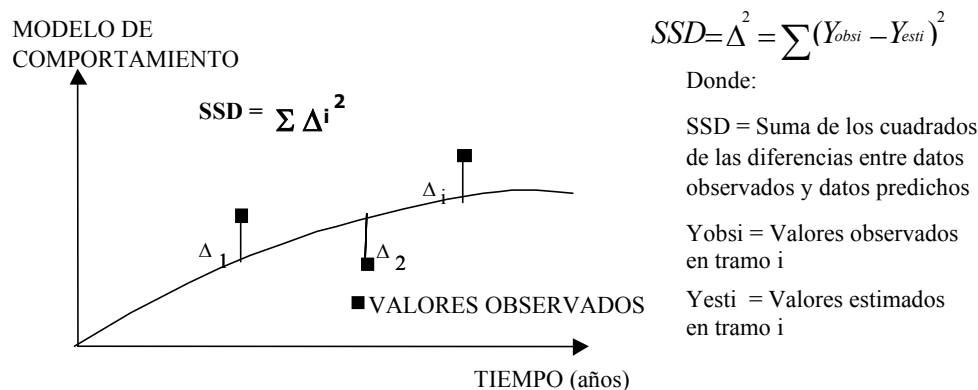
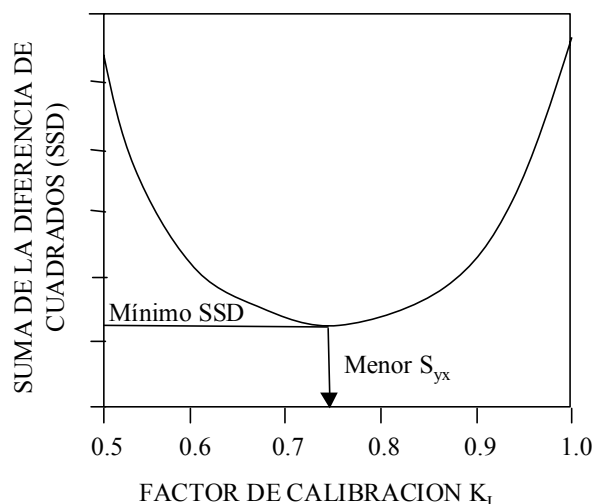


Figura 3. Minimización de cuadrados de las diferencias entre valores estimados y medidos.

El minimizar el valor de SSD conlleva una reducción del error medio de estimación (S_{yx}) que permite encontrar el factor de calibración K_i que asegura el mejor ajuste de la curva de deterioro y por ende la calibración del modelo de comportamiento analizado (Kannemeyer y Visser, 1996), tal como se muestra en la Figura 4.





$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obsi} - Y_{esti})^2}{N - 1}}$$

Donde:

S_{yx} = Error de estimación de la predicción

Y_{obsi} = Valor observado en el tramo i

Y_{esti} = Valor estimado en el tramo i

N = Tamaño de la muestra

Figura 4. Suma de la diferencia de los cuadrados de las diferencias de los datos predichos y medidos contra el valor de los factores de calibración K_i .

2.4 Determinación del Valor de IRIo Optimo

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

Teniendo en cuenta los antecedentes y la experiencia, se consideró como punto de partida para la identificación del valor de rugosidad inicial, que para el caso de las mezclas asfálticas (recapados o pavimentos nuevos), los niveles de IRIo 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. Para el caso de los dobles tratamientos el valor de IRIo 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. CALIBRACION DEL MODELO DE PROGRESION DE LA RUGOSIDAD DE HDM

En forma paralela se determinaron los factores de calibración correspondientes a los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos de HDM-III y HDM-4, pero el análisis se enfatizó especialmente en el estudio del HDM-4 debido a que se consideró prioritario revisarlo y calibrarlo 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 a las necesidades y exigencias de los usuarios, así como el tiempo y recursos disponibles, determinará el grado de confiabilidad, sensibilidad 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 sea el caso involucran cierto nivel de esfuerzo y recursos para alcanzarlos (Bennett y Paterson, 2000). En este estudio se consideró que las exigencias y 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 dentro del proyecto del cual se desprendió este estudio (de Solminihac et al, 2001). Esto quiere decir que se utilizaron en cada una de las categorías analizadas, los factores de ajuste correspondientes a los modelos de agrietamiento, baches, pérdida de áridos y ahuellamiento encontrados por el mismo grupo de investigadores para HDM en las condiciones particulares de Chile.

Otro aspecto que es de vital importancia mencionar, se refiere a la determinación del factor k_{gm} (factor de calibración medioambiental de la rugosidad), el cual es determinante y que 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 efectuados por la Pontificia Universidad Católica de Chile, los cuales identificaron cuatro grandes zonas climáticas en el país (Norte, Centro, Sur y Extremo Sur), para las que respectivamente se definieron valores para el 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, en este estudio sólo se consideraron tres de las cuatro zonas del país. La Tabla 3 incluye los valores adoptados para m y k_{gm} en el presente estudio para las tres zonas consideradas del país.

Tabla 3. Valores del coeficiente medioambiental m y Factor de calibración k_{gm} adoptados para las modelaciones de HDM-4

Zona Climática	Coeficiente Medio Ambiental m	Factor de Calibración k_{gm}
Norte	0.01	0.43
Centro	0.03	1.30
Sur	0.04	1.74

Una vez definido el contexto de calibración que exige ser 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 y Kerali 2000):

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

Donde:

K_{gp} = Factor de calibración para la progresión de la rugosidad.

ΔRI = Incremento total del IRI en m/km durante el año o temporada.

ΔRIs = Componente estructural del incremento del IRI.

ΔRIc = Componente del agrietamiento del incremento del IRI.

ΔRIr = Componente de ahuellamiento del incremento del IRI.

$\Delta RI t$ = Componente de baches del incremento del IRI.

ΔRIe = 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. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Análisis de los Resultados Alcanzados en la Calibración por Categorías

Mediante un proceso iterativo, se logró encontrar 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_{yx}) encontrados para cada caso. Estos resultados son mostrados en la Tabla 4.

Como ya se ha mencionado, debido a la fuerte incidencia del valor de la rugosidad inicial (IRIo) 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 IRIo que representa la condición inicial del pavimento bajo la cual se realizó la calibración del modelo.

Un aspecto que es importante mencionar y que se puede ver en la Tabla 5, es el relacionado con el elevado error de estimación que se encontró para el caso específico de los factores de calibración de la zona sur (climas fríos). Esto podría explicarse debido a 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 sobre por qué el programa entrega estos resultados, más aun cuando los modelos de comportamiento no presentan problema, hecho que fue comprobado 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.



Tabla 4. 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		
					IRIo	k_{gp}	S_{vx}	IRIo	k_{gp}	S_{vx}
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	Recapado	Sur	Alto	Baja	1.20	4.00	0.73	0.80	0.10	8.21
8A	Recapado	Norte	Alto	Media	1.20	5.20	0.55	1.20	4.20	0.54
13B	Recapado	Norte	Alto	Baja	1.50	0.20	0.59	1.80	0.10	0.63
14B	Recapado	Sur	Alto	Media	1.40	0.50	0.72	0.80	0.10	1.52

DTA: Doble Tratamiento Asfáltico.

4.2 Determinación de Factores de Calibración Medios Globales

Organizando y clasificando los valores contenidos en la Tabla 5, con respecto a las variables y niveles principales de factorial se encontraron factores promedios globales (Tabla 6). 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 estudiadas en la investigación. Por otro lado se buscó identificar la incidencia de las variables que caracterizan los distintos escenarios y las posibles tendencias de los valores promedios encontrados. En la Tabla 5 se presentan los valores de IRIo y k_{gp} obtenidos para HDM-III y HDM-4.

4.3 Relación Entre el Factor de Calibración k_{gp} y el Valor de Rugosidad Inicial IRIo

La calibración del modelo de progresión de la rugosidad no puede considerarse absoluta y restringida al empleo de un valor de k_{gp} único, si se considera el alto grado de dependencia que se tiene con respecto al valor de rugosidad inicial IRIo que se adopte. Por este motivo se sugiere un análisis que permitiera lograr no solamente un valor óptimo de k_{gp} para un determinado valor de IRIo, sino que además estableciera una función que permita estimar el valor de k_{gp} más recomendable dependiendo del valor de rugosidad inicial que se tenga en la situación a modelar.

Fue así como se logró establecer que la relación existente obedece a una función de la forma $k_{gp} = -a \cdot \text{IRIo} + b$, siendo a y b dos coeficientes propios de la categoría analizada. La Tabla 6 presenta el listado de las respectivas relaciones entre k_{gp} e IRIo para cada una de las categorías que permitan ampliar la cobertura de la calibración.



Tabla 5. Factores medios globales de progresión de la rugosidad de pavimentos asfálticos k_{gp} obtenidos para HDM-III y HDM-4

Variable del Factorial	Nivel del Factorial	IRIo				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 Climática	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/d
	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

Es importante mencionar que el rango dentro del cual es válido este ejercicio depende del tipo de superficie, ya que la rugosidad inicial para mezclas asfálticas oscila dentro de un rango distinto respecto de los dobles tratamientos. Esto se puede observar mejor en la Figura 5 en donde se muestran los dos casos particulares antes mencionados.



Tabla 6. Ecuaciones para la determinación del valor óptimo de k_{gp} en función del valor de rugosidad inicial $IRIo$ ($k_{gp} = -a*IRIo + b$)

Categoría	Tipo de Estructura	HDM-III				HDM-4			
		Rango $IRIo$	a	b	b/a	Rango $IRIo$	a	b	b/a
1A	DTA	2.0-2.8	-5.29	15.37	-2.91	2.0-2.8	-4.00	12.70	-3.18
2A	DTA	1.8-2.4	-0.47	1.29	-2.73	2.0	s/d	s/d	s/d
3A	DTA	2.0-2.7	-3.08	8.68	-2.82	2.0-2.7	-2.50	6.35	-2.54
4A	DTA	1.8-2.1	-4.64	10.15	-2.19	2.0	s/d	s/d	s/d
5A	DTA	2.0-2.7	-1.82	5.64	-3.10	2.0-2.7	-2.17	5.98	-2.76
6A	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
Valores Promedio para Dobles Tratamientos Asfálticos		1.8-2.8	-4.48	12.10	-2.68	2.0-2.8	-3.80	10.30	-2.76
10B	M. Asf.	0.8-1.5	-11.83	17.86	-1.51	0.8-1.8	-5.25	8.50	-1.62
7A	Recapada	0.8-1.8	-5.87	11.08	-1.89	2.0	s/d	s/d	s/d
8A	Recapada	0.8-1.8	-7.19	13.83	-1.92	0.8-1.4	-4.00	9.00	-2.25
13B	Recapada	0.8-1.5	-13.80	20.86	-1.51	0.8-1.8	-2.33	4.30	-1.84
14B	Recapada	0.8-1.3	-20.76	28.50	-1.37	2.0	s/d	s/d	s/d
Valores Promedio para Mezclas Asfálticas y Recapados		0.8-1.8	-11.9	18.4	-1.60	0.8-1.8	-3.90	7.30	-1.90

s/d: sin datos, debido a la escasa confiabilidad obtenida para los tramos en climas fríos, se evita entregar un valor para estas categorías.



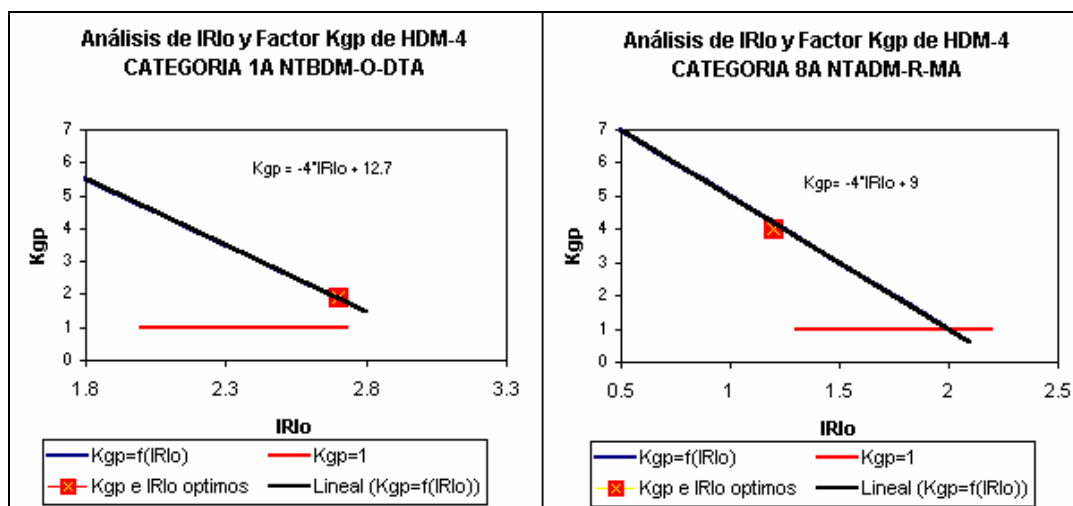


Figura 5. Relaciones del tipo $k_{gp}=f(IRIo)$ para HDM-4 para dobles tratamiento superficiales y recapados.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones Surgidas del Estudio

A partir de la experiencia entregada por el presente proyecto de investigación, es posible concluir que es razonablemente factible realizar un proceso de calibración del conjunto de modelos de comportamiento incluidos en HDM-4 en un periodo entre 12 y 18 meses, en función de la disponibilidad de la información, la facilidad de lograr mediciones de deterioro y el número de escenarios a evaluar.

A pesar de la gran extensión longitudinal de Chile que conlleva contar con tramos separados por grandes distancias, aspecto que afectó el rendimiento de recolección de datos, se logró recoger la totalidad de la información requerida en un lapso cercano a los 7 meses.

Respecto a las predicciones entregadas por los modelos calibrados de HDM-III y HDM-4 para el caso de la rugosidad, no se observaron mayores diferencias. Sin embargo es posible notar ligeros cambios en los resultados arrojados por ambos programas como consecuencia de las diferencias existentes en otros deterioros (grietas, baches, ahuellamiento) o aspectos relacionados con el software que pueden contribuir a esta diferencia.

Salvo por algunas variaciones detectadas en las predicciones del comportamiento efectuadas con HDM-4 para el caso específico de tramos localizados en climas fríos, el programa debidamente ajustado entrega una aceptable representación de la realidad. A este respecto convendría revisar el software ya que según el análisis realizado, los modelos no son en apariencia el problema, ya que los valores entregados por las simulaciones efectuadas en hojas de cálculo presentan un adecuado ajuste con respecto a los valores observados.

Al analizar los valores medios globales se detectó un ligero nivel de influencia del tránsito en los valores encontrados de k_{gp} , que crece a medida que aumenta el nivel de tránsito. Sobre la relación entre la deflexión y el IRIo, está determinada por una disminución en el valor de la rugosidad inicial en la medida que la deflexión aumenta.

Se ratificó la gran incidencia que tiene el valor de la rugosidad inicial en el resultado definitivo del proceso de calibración del modelo de rugosidad. Como alternativa se sugiere un conjunto de relaciones lineales que permitan ampliar la cobertura del proceso de calibración desarrollado, ya que se adaptaría el factor de calibración según el valor de IRIo que tenga el camino a modelar.

5.2 Recomendaciones Generales

Con los resultados finales alcanzados se pudo ratificar la gran utilidad de emplear la metodología de “ventanas” en la ejecución de proyectos de calibración, ya que permite en un lapso razonablemente corto obtener un volumen de información suficientemente amplio, que represente la generalidad de un país o región con un nivel de confiabilidad aceptable. Por lo tanto, se recomienda emplear esta metodología en investigaciones similares a la presentada en este documento.

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 manifestadas en la modelación de tramos localizados en climas fríos independiente del nivel de tránsito o estructura que posean. Se sugiere revisar el software en lo que a este



aspecto se refiere, pues se considera que las ecuaciones y modelos correspondientes entregan valores adecuados y ajustados a la realidad, según se pudo comprobar en modelaciones hechas en planillas electrónicas.

Debido a la gran influencia del valor de rugosidad inicial, se recomienda crear bases de datos que permitan registrar este valor para distintos tipos de estructuras y condiciones de operación de modo que se puedan efectuar calibraciones con valores IRI_0 más certeros y confiables que los estimados estadísticamente.

De igual forma a como se establecieron relaciones de calibración entre el IRI_0 y K_{gp} , se podrían definir relaciones similares para otros modelos si se detectan niveles de influencia bastante elevados de una variable en particular con respecto a las predicciones alcanzadas.

Se recomienda utilizar los factores de calibración sugeridos para el modelo de progresión de la rugosidad para el caso de Chile, incluso a pesar de haber detectado para el caso particular de los climas fríos problemas en la modelación, ya que inclusive en estos casos el error en la estimación se reduce notoriamente con respecto a las predicciones entregadas por el modelo sin calibrar.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Unidad de Gestión Vial de 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.

7. REFERENCIAS

- BENNETT, C.R., PATERSON, D.O. (2000), *A Guide to Calibration and Adaptation of HDM-4*, The Highway Development and Management Series, Volume five, Association Mondiale de la Route AIPCR, 2000.
- DE SOLMINIHAC, H., VIDELA, C., ECHEVERRÍA, G., GAETE, R. y CAROCA, A. (1989), *Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos*, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- DE SOLMINIHAC, H. HIDALGO, P., SALGADO, M. (2001), *Seguimiento para la calibración de modelos de deterioro de pavimentos asfálticos*. Ministerio de Obras Públicas de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- KANNEMEYER, L., VISSER, A.T. (1996), *Calibration of HDM-III Performance Models for Use in Pavement Management of South African National Roads*, Transportation Research Record 1508, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- ODOKI, J.B., KERALI, H. G. R. (2000), *Analytical Framework and Model Descriptions*, The Highway Development and Management Series, Volume four, Association Mondiale de la Route AIPCR.
- VIDELA, C., ECHEVERRÍA G., GAETE, R. y CAROCA, A. (1992) *Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos. Vol. IV: Sistema de Gestión de Pavimentos GIMP*, Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- VIDELA, C., DE SOLMINIHAC, H., GAETE, R. y BUSTOS, M. (1996), *Ajuste de Factores de Calibración para Ampliar Modelos de Deterioro de Pavimentos asfálticos*. Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.



Hernán de Solminihaç,

Ingeniero Civil, Magister en Ciencia de la Ingeniería, Doctor
Profesor Titular, Departamento de Ingeniería y Gestión
de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Civil Engineer, M.Sc., Ph. D.,
Professor, Department of Construction Engineering and Management
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
hsolmini@ing.puc.cl

Mauricio Salgado,

Ingeniero Civil, Magister en Ciencia de la Ingeniería
Jefe de Geotecnia, Vías y Transporte,
Pontificia Universidad Javeriana de Colombia
Bogotá D.C., Colombia

Civil Engineer, M.Sc,
Geotechnic, Roads and Transport Chief
Pontificia Universidad Javeriana de Colombia
Bogotá D.C., Colombia

Priscila Hidalgo

Ingeniero Civil, Magister en Ciencia de la Ingeniería
Ingeniero Investigador, Dictuc S.A.
Santiago, Chile

Civil Engineer, M. Sc.,
Researcher Engineer, Dictuc S.A.
Santiago, Chile
phidalgs@puc.cl

Miguel Valdés

Ingeniero Civil,
Unidad de Gestión Vial, Dirección Nacional
de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile,
Santiago, Chile

Civil Engineer,
Road Management Unit, National Highway Department,
Ministry of Public Work,
Santiago, Chile

