

IAG85-03-2013
CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE FISURACIÓN TIPO PIEL DE
COCODRILO Y AHUELLAMIENTO DE LA GUÍA AASHTO MEPDG
PARA LAS CONDICIONES DEL ALTIPLANO BOLIVIANO
CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE TRINCAMENTO TIPO PELE DE
CROCODILO E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DA GUIA AASHTO
MEPDG PARA AS CONDIÇÕES DO ALTIPLANO BOLIVIANO

Orlando Rojas Torrico
Mecanicista Ltda
Cochabamba, Bolivia
lando_014@hotmail.com

Christian O. Rojas Torrico
Mecanicista Ltda
Cochabamba, Bolivia
christianrojas_@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo resume el proceso de calibración de los modelos de la Guía MEPDG de fisuración tipo piel de cocodrilo y ahuellamiento en pavimentos flexibles, a las condiciones del altiplano boliviano, región caracterizada por su altitud mayor a 3000 m.s.n.m. Para ello, se seleccionaron diez carreteras de la región estudiada, con un total de 137 secciones analizadas. La información del estado estructural y funcional de los pavimentos fue obtenida del Inventario Vial de la Red Fundamental de Bolivia. Adicionalmente, los autores realizaron la investigación de las características de los materiales, además del relevamiento de deterioros de ciertas secciones, a fin de ampliar la información disponible. Además, se determinaron las condiciones de tráfico y clima a las cuales se vieron sometidos los tramos analizados durante su periodo de servicio. Posteriormente se realizó la simulación de la evolución de deterioros en las secciones estudiadas mediante el programa MEPDG v1.100, modificándose sistemáticamente los factores de calibración de los modelos hasta obtener la combinación que permitió el mejor ajuste entre valores estimados de deterioro y los observados en campo. Finalmente, se validaron los modelos calibrados a partir del desempeño estimado de secciones no consideradas en el ajuste.

Resumo

O presente trabalho resume o processo de calibração dos modelos da Guia MEPDG de trincamento tipo pele de crocodilo e deformação permanente em pavimentos asfálticos, as condições do altiplano boliviano, região caracterizada por sua altitude maior a 3000 m.s.n.m. Seleccionaram-se dez rodovias da região estudada, com um total de 137 seções analisadas. A informação do estado estrutural e funcional dos pavimentos foi obtida do inventario de rodovias da Red Fundamental de Bolívia. Adicionalmente, os autores realizaram a investigação das características dos materiais, além do relevamento do deterioro de certas seções, a fim de ampliar a informação disponível. Além disso, determinaram-se as condições de tráfego e clima as quais

foram submetidas às rodovias analisadas durante o seu período de serviço. Posteriormente, realizou-se a simulação da evolução do deterioro nas secções estudadas mediante o programa MEPDG v1.100, mudando-se sistematicamente os fatores de calibração dos modelos hasta obter a combinação que permitiu o melhor ajuste entre valores estimados de deterioro e os observados em campo. Finalmente, validaram-se os modelos calibrados a partir do desempenho estimado de secções não consideradas no ajuste.

INTRODUCCIÓN

La Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) constituye una gran mejora y cambio en la forma en que los pavimentos son diseñados en la actualidad. Ésta, al estar basada en principios empírico-mecanicistas, permite realizar simulaciones más detalladas del pavimento sometido a las solicitaciones de tráfico y clima, además de considerar en el análisis aquellas propiedades específicas de los materiales que componen la estructura, superando así a las metodologías de diseño puramente empíricas.

Al ser la MEPDG en parte empírica, ésta emplea modelos matemáticos que transforman la respuesta del pavimento sometido a distintas solicitaciones, en deterioros que evolucionan a lo largo de la vida útil de la estructura. Estos modelos constituyen un elemento muy importante para la obtención de resultados precisos y diseños adecuados. Por esto, deberán considerar las características de la estructura y de la región en que ésta se encuentra, requiriéndose para ello la validación y calibración de los modelos a determinadas condiciones específicas.

El presente estudio trata sobre la calibración de los modelos de fisuración tipo piel de cocodrilo y ahuellamiento de la MEPDG a las condiciones específicas del altiplano boliviano. Esta región se caracteriza por estar ubicada a una altura superior a 3000 m.s.n.m., así como por su aridez y las bajas temperaturas que se presentan la mayor parte del año. Una gran parte de la Red Vial Fundamental de Bolivia atraviesa esta región, existiendo carreteras con elevados niveles de tráfico y cargas, y que constituyen rutas troncales del país. Por último, al ser el altiplano boliviano una región muy particular del mundo, se requiere aún más de la calibración de los modelos de deterioro para la correcta predicción del mismo a lo largo del tiempo.

INFORMACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE DETERIORO

Para calibrar los modelos mencionados fue necesario contar con una gran cantidad de información de deterioros, tráfico, clima y características del pavimento de distintos tramos ubicados en la región del altiplano. La recolección de esta información se explica a continuación.

Datos de deterioros y de la capacidad estructural y funcional del pavimento

Inicialmente, se obtuvo información de deterioros (ahuellamiento y fisuración tipo piel de cocodrilo), deflectometría de impacto, rugosidad y espesores de capa de distintos tramos ubicados en la región del altiplano. Esta información fue proporcionada por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), y forma parte del Inventario Vial de la Red Fundamental de Bolivia, realizado en 2008.

Posteriormente, en base a los datos recolectados, se seleccionó un conjunto de doce tramos de los cuales se contaba con la información necesaria, destinándose diez de ellos para la etapa de calibración y dos para la validación de los resultados. En esta etapa se procuró que los tramos seleccionados se encuentren lo suficientemente espaciados en el altiplano, a fin de considerar las posibles diferencias entre un sitio y otro. Los tramos seleccionados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Información de los tramos seleccionados para la calibración de los modelos de deterioro

Tramos de calibración de modelos de deterioro				
Ruta RVF	Departamento	Tramo	Longitud (km)	Año apertura
1	La Paz	Ayo Ayo - Patacamaya	20.16	2005*
	La Paz	Sica Sica - Cruce Luribay	16.15	2005*
	La Paz	Cruce Luribay - Panduro	20.06	2005*
	Potosí	Ventilla - Yocalla	62.50	2004
	Potosí	Yocalla - Tarapaya	19.50	2004
	Potosí	Potosí - Cuchu Ingenio	35.90	2004
4	Oruro	Caihuasi - Huayllamarca	30.00	1993
	Cochabamba	Huayllamarca - Confital	25.00	1993
7	Cochabamba	Cochabamba – La Angostura	9.20	1999
12	Oruro	Oruro – Capachos	3.10	1998
Tramos de validación de resultados				
Ruta RVF	Departamento	Tramo	Longitud (km)	Año apertura
2	La Paz	Río Seco – Patamanta	25.00	2001
4	Oruro	Caracollo – Caihuasi	17.25	1994

* Año de conclusión del recapamiento del tramo

Cada uno de estos tramos fue dividido en distintas secciones homogéneas en cuanto a deterioros, IRI y parámetros estructurales (deflexión máxima, módulo resiliente de la subrasante), definiéndose así un total de 137 secciones homogéneas destinadas para la calibración de los modelos, y 18 para la validación de los resultados obtenidos en este estudio. Adicionalmente, en 2011, los autores realizaron el relevamiento de deterioros de ciertas secciones homogéneas definidas previamente, a fin de ampliar la información disponible.

Datos de clima

La MEPDG emplea el modelo climático EICM (“Enhanced Integrated Climatic Model”) para considerar el efecto del medio ambiente en los materiales que componen el pavimento. Para ello, EICM requiere de información horaria de distintas variables climáticas. Esta información fue obtenida mediante estaciones climáticas ubicadas en distintos puntos del altiplano.

Parte de los datos climáticos fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), mientras que la información faltante fue obtenida de las estaciones climáticas de los aeropuertos de El Alto y Cochabamba. Los datos recopilados corresponden al periodo comprendido entre 2006 y 2010.

Sin embargo, hasta este punto los únicos datos horarios con los que se contaba eran los correspondientes a los aeropuertos mencionados, ya que los datos proporcionados por SENAMHI

solamente correspondían a mediciones diarias. Por esta razón, fue necesario generar los datos horarios faltantes adoptando el comportamiento de las variables climáticas medidas de forma horaria en los aeropuertos indicados, y reproduciendo dicho comportamiento a partir de los datos diarios recolectados por las demás estaciones. Esto se ilustra en la Figura 1.

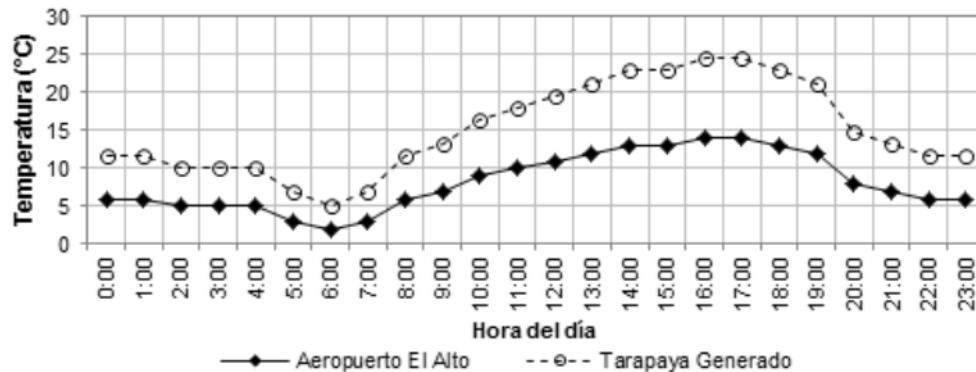


Figura 1: Ilustración de la generación de datos climáticos (Rojas, 2013)

Una vez obtenida la información requerida, se procedió a crear los archivos climáticos *.icm* requeridos por el modelo. Para esto, se empleó la versión independiente de EICM, en el cual se introdujeron los datos horarios correspondientes a cada estación climática, y se generaron directamente los archivos *.icm*, considerando para ello la ubicación geográfica de los tramos estudiados. Posteriormente, estos archivos climáticos fueron directamente cargados en el software MEPDG 1.100, empleado en este estudio.

Datos de tráfico

Los datos de TPDA, composición vehicular y factores de ajuste estacional fueron obtenidos de los informes de Estadística Vial, elaborados por la ABC. A partir de estos datos se definió el tipo de crecimiento del tráfico a lo largo del periodo de análisis, seleccionando entre el tipo lineal y el compuesto. Posteriormente, para el tipo de crecimiento definido, se determinó la tasa de crecimiento mediante regresión. Esto fue realizado para cada uno de los tramos analizados.

Por otra parte, las distribuciones de carga, por tipo de eje y por tipo de vehículo, fueron obtenidas de informes de pesaje correspondientes a cuatro retenes localizados en la región del altiplano (Achica Arriba, Caihuasi, San Antonio y Suticollo). Estos datos fueron proporcionados por Vías Bolivia.

Posteriormente, debido a que la MEPDG se basa en la clasificación vehicular de la FHWA, fue necesario realizar la transformación de la información de tráfico a este sistema de clasificación. Para ello, se encontró la equivalencia existente entre la clasificación vehicular de la FHWA y las distintas categorías vehiculares identificadas de la combinación de la clasificación vehicular de la ABC y la que presenta la Ley de Cargas, empleada esta última en el pesaje. En esta comparación fue excluido el tipo 13 del sistema de la FHWA, ya que estos vehículos no se presentan en Bolivia hasta la fecha. La equivalencia encontrada entre las clasificaciones vehiculares mencionadas se presenta en la Tabla 2, la cual es válida solamente para vehículos pesados, ya que la MEPDG ignora los vehículos livianos en la simulación del desempeño del pavimento.

Tabla 2: Equivalencia encontrada entre clasificación FHWA y categorías ABC y Ley de Cargas (Rojas, 2013)

Clasificación FHWA		Código por tipo de ejes	Tipo Ley de Cargas	Clasificación ABC	
Tipo	Descripción			Tipo	Descripción
4	Bus	1S:1D	-	4	Microbús
		1S:1D	58	5	Bus mediano (2 ejes)
		1S:2D	60	6	Bus grande (3 ejes)
5	Camión simple, dos ejes, seis ruedas	1S:1S	1	7	Camión mediano (2 ejes)
		1S:1D	3	8	Camión grande (2 ejes)
6	Camión simple, tres ejes	1S:2D	5	9	Camión grande (3 ejes)
7	Camión simple, cuatro o más ejes	1S:1S:2D	6	9	Camión grande (3 ejes)
		1S:3D	8		
		2S:2D	9		
8	Semirremolque, cuatro o menos ejes	1S:1D:2D	38	10	Tracto camión con semirremolque
		1S:1D:1D:1D	39		
9	Semirremolque, cinco ejes	1S:1D:3D	41	10	Tracto camión con semirremolque
		1S:1D:1D:2D	42		
		1S:2D:2D	48		
		1S:2D:1D:1D	49		
10	Semirremolque, seis o más ejes	1S:2D:3D	51	10	Tracto camión con semirremolque
		1S:2D:1D:2D	52		
11	Camión o semi c/acoplado, 5 o menos ejes	1S:1D + 1D:1D	17	11	Camión con remolque
		1S:1D + 1D:2D	19		
		1S:2D + 1D:1D	23		
12	Camión o semi con acoplado, seis ejes	1S:2D + 1D:2D	25	11	Camión con remolque
		1S:3D + 1D:1D	32		

Datos de materiales

Fue necesario también caracterizar las propiedades de los materiales que componen el pavimento de cada uno de los tramos seleccionados. Esta información fue obtenida de los estudios de diseño estructural de pavimentos de los tramos mencionados, así como de los controles de calidad realizados durante la construcción de los mismos y del Inventario Vial de la Red Fundamental.

Las propiedades de la mezcla asfáltica fueron obtenidas de los diseños Marshall realizados durante la construcción de los tramos. En cuanto a los ligantes asfálticos, fue necesario adoptar las relaciones viscosidad-temperatura predefinidas por la MEPDG en función de la penetración, debido a que en ningún caso fue posible contar con todos los ensayos requeridos para poder elaborar las curvas de susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos.

A partir de esta información, ya era posible obtener el módulo dinámico de la mezcla asfáltica (E^*) a distintas temperaturas, mediante el modelo de Witczak, el cual la MEPDG emplea para información de nivel 2 y 3 (NCHRP, 2004).

Por otra parte, las propiedades mecánicas (CBR, módulo resiliente) de los suelos de subrasante y de los materiales granulares que componen el pavimento, fueron obtenidas de los controles de calidad ejecutados durante la construcción de las carreteras y mediante retrocálculo modular en base a los cuencos de deflexiones medidos con FWD que forman parte del Inventario Vial. En su

mayoría, las propiedades físicas de los suelos fueron obtenidas de igual forma de los controles de calidad ejecutados en la etapa de construcción de los tramos considerados en el estudio.

CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE DETERIORO

Calibración de los modelos de fisuración tipo piel de cocodrilo

Este deterioro se encuentra relacionado con el daño por fatiga que se produce en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, el cual se determina empleando la Ley de Miner (Huang, 2004):

$$DI = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Donde DI es el daño acumulado, n_i es el número esperado de repeticiones de una determinada carga en el periodo i , y N_i es el número admisible de repeticiones de dicha carga en el periodo i que provocan la fisuración de la carpeta asfáltica. Este último término se obtiene mediante la siguiente ecuación (AASHTO, 2008):

$$N_i = 0.007566(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_i)^{-3.9492\beta_{f2}}(E^*)^{-1.2818\beta_{f3}} \quad (2)$$

Donde ε_i es la deformación unitaria por tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, E^* es el módulo dinámico del concreto asfáltico (Psi), C y C_H son términos que dependen de las propiedades de la mezcla asfáltica y del espesor de la carpeta, respectivamente; mientras que β_{f1} , β_{f2} y β_{f3} son los factores de calibración local del modelo (por defecto, iguales a 1).

Posteriormente, el daño acumulado a una determinada edad del pavimento es convertido en porcentaje de fisuración en la carpeta asfáltica mediante la siguiente función de transferencia (AASHTO, 2008):

$$FC = \left[\frac{1}{60} \right] \left[\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \log(DI*100))}} \right] \quad (3)$$

Donde FC es el porcentaje de área fisurada en la superficie de la carpeta asfáltica, DI es el daño acumulado por fatiga, C_4 , C_1 y C_2 son los factores de calibración de la ecuación ($C_4=6000$, $C_1=1$ y $C_2=1$). Por último, C_1^* y C_2^* son términos que dependen del espesor de la carpeta asfáltica.

Inicialmente se realizó la verificación de los modelos que presenta por defecto la MEPDG. Para esto, se estimó el deterioro a lo largo de la vida útil del pavimento para cada una de las secciones homogéneas. Luego, la fisuración estimada fue comparada con la representativa de la sección homogénea, obtenida esta última de las mediciones de campo. Esta etapa permitió identificar una gran subestimación del deterioro calculado mediante los modelos por defecto, que se observa en la Figura 2, siendo por tanto necesaria la calibración de los modelos.

Para calibrar los modelos se propuso encontrar aquella combinación de factores de ajuste que permitían minimizar el error cuadrático acumulado del modelo, el cual se define en la siguiente ecuación:

$$SSE = \sum (Y_{obs} - Y_{est})^2 \quad (4)$$

Donde SSE es el error cuadrático acumulado del modelo, Y_{obs} es el deterioro real, observado en campo, y Y_{est} es el deterioro estimado por el modelo.

En un inicio se buscó optimizar los factores no lineales β_{f2} y β_{f3} del modelo de fatiga. Para ello, se definieron nueve series (β_{f2} , β_{f3}) y para cada una de ellas se determinó el deterioro empleando el software MEPDG 1.100 (durante el periodo en que éste se encontraba disponible), resultando así en nueve corridas del programa por sección homogénea considerada. Posteriormente, se determinó el valor de SSE para cada una de las nueve series consideradas, y finalmente se seleccionó el par que menor valor de SSE proveía ($\beta_{f2}=0.8$ y $\beta_{f3}=0.8$). Esto se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Series de factores no lineales (β_{f2} , β_{f3}) consideradas en el proceso de calibración

Serie	β_{f2}	β_{f3}	SSE
1	0.80	1.00	433434
2	0.80	0.85	41730
3	0.80	0.80	16400
4	1.00	1.25	112533
5	1.00	1.20	27368
6	1.00	1.15	28956
7	1.20	1.50	35300
8	1.20	1.55	18736
9	1.20	1.60	89663

Posteriormente se optimizó el factor lineal β_{f1} del modelo de fatiga y los factores C_1 y C_2 de la función de transferencia. Esto fue realizado mediante el complemento Solver de Microsoft Excel a partir del daño por fatiga, calculado en la simulación realizada en el software MEPDG 1.100 (considerando los factores β_{f2} y β_{f3} definidos previamente, y variando simultáneamente los valores de β_{f1} , C_1 y C_2 hasta encontrar aquella combinación que proporcionaba el mínimo valor de SSE, siendo por tanto los factores de calibración de los modelos de fisuración.

Los factores encontrados permitieron reducir el anterior valor de SSE de 16400, a 11735, siendo este último el mínimo valor obtenido. El procedimiento anterior permitió mejorar en gran medida la estimación del deterioro, como puede observarse en la Figura 2.

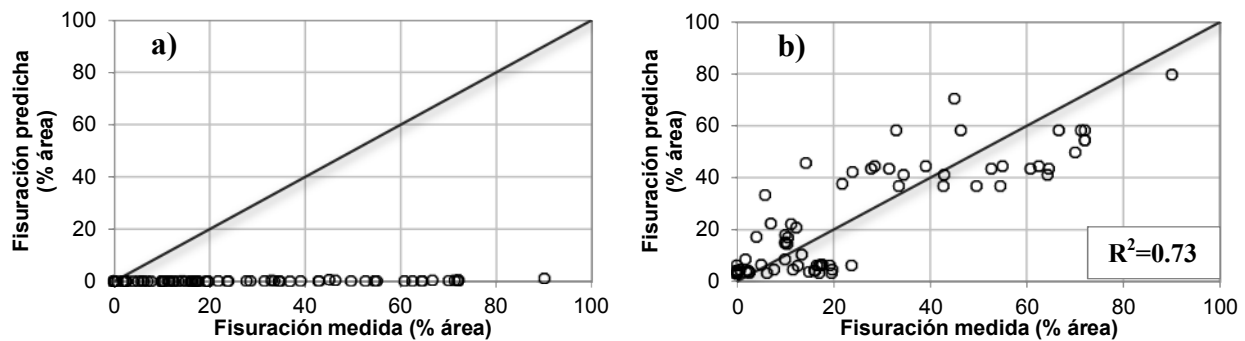


Figura 2: Fisuración predicha vs medida a) antes de la calibración – b) después de la calibración

Calibración de los modelos de ahuellamiento

La MEPDG calcula el ahuellamiento total en la estructura como la suma de las deformaciones permanentes que ocurren en cada capa de la estructura, incluyendo la subrasante. En el caso de las mezclas asfálticas, el ahuellamiento en estas capas es calculado mediante el siguiente modelo (AASHTO, 2008):

$$\Delta_{p(HMA)} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_{r(HMA)} 10^{-3.35412} n^{0.4791\beta_{2r}} T^{1.5606\beta_{3r}} h_{(HMA)} \quad (5)$$

Donde $\Delta_{p(HMA)}$ es la deformación permanente en las capas asfálticas, $\varepsilon_{r(HMA)}$ es la deformación unitaria de compresión en el centro de la capa asfáltica, n son las repeticiones de una carga determinada de tráfico, T es la temperatura del material en la mitad del espesor de la capa (°F), $h_{(HMA)}$ es el espesor de la capa (cm o in), k_z es un término que depende del espesor, y β_{1r} , β_{2r} y β_{3r} son los factores de calibración local del modelo (por defecto igualados a 1).

Para el cálculo de la deformación permanente en las capas granulares y de subrasante, la MEPDG emplea el siguiente modelo (AASHTO, 2008):

$$\Delta_{p(suelo)} = \beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{n} \right)^\beta} h_{suelo} \quad (6)$$

Donde $\Delta_{p(suelo)}$ es la deformación permanente en la capa analizada, ε_v es la deformación unitaria de compresión en el centro de la capa, n son las repeticiones de una carga determinada, h_{suelo} es el espesor de la capa analizada, k_{s1} es el factor de calibración global del modelo (2.03 para materiales granulares y 1.67 para subrasantes) y β_{s1} es el factor de calibración local del modelo (por defecto igual a 1). Por su parte, $(\varepsilon_0/\varepsilon_r)$, ρ y β son términos que dependen del módulo resiliente del contenido de humedad de la capa analizada.

En un inicio, se simuló cada una de las secciones consideradas en el estudio en el programa MEPDG 1.100 y se determinó el ahuellamiento total de las mismas, el cual fue comparado con el valor representativo (obtenido de las mediciones de campo), encontrándose así una elevada sobreestimación del deterioro por parte de los modelos por defecto, que puede distinguirse en la Figura 3. Al evidenciar aquello, resultó necesaria la calibración de los modelos. Cabe resaltar que la información disponible corresponde a ahuellamientos totales, por lo cual la calibración debía realizarse para el ahuellamiento total de la estructura, y no así para la deformación permanente en cada una de las capas.

Se decidió entonces encontrar los factores lineales de calibración (β_{1r} y β_{s1}) correspondientes a cada uno de los diez tramos considerados en el estudio. Dichos factores posteriormente fueron relacionados con algunas variables que intervienen en la evolución del deterioro, como ser la temperatura, precipitaciones, niveles de tráfico, etc., encontrándose cierta relación con la edad a la medición del deterioro y el módulo resiliente de la subrasante. Una vez identificado esto, se optó por relacionar los factores de calibración encontrados con las variables identificadas, obteniendo así ecuaciones de regresión en base a las mismas, que permiten obtener los factores de calibración de los modelos anteriores.

El procedimiento anterior permitió mejorar la estimación del deterioro, como puede distinguirse en la Figura 3. Si bien aún existen errores de estimación del deterioro, éstos no pudieron ser corregidos en la presente investigación, debiendo ser enmendados en estudios posteriores.

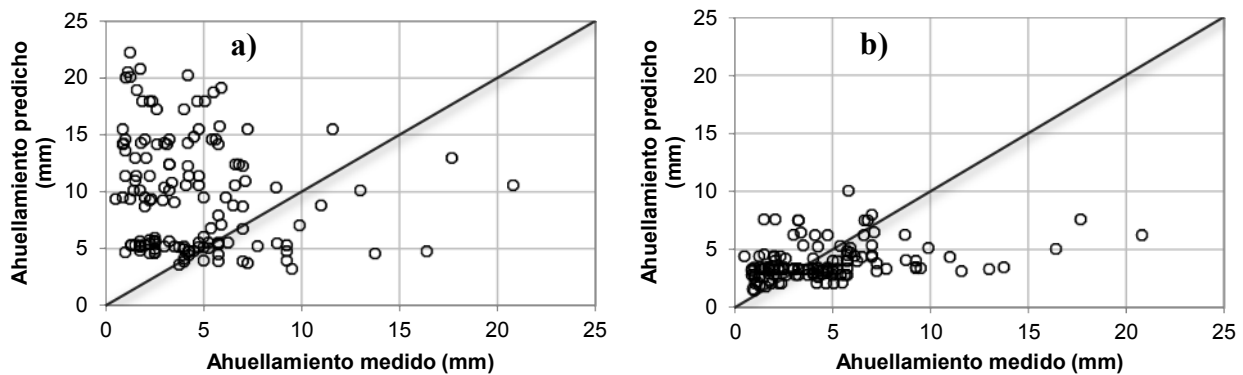


Figura 3: Ahuellamiento predicho vs medido a) antes de la calibración – b) después de la calibración

Validación de los resultados obtenidos

Posteriormente, era necesario validar los resultados obtenidos en la etapa de calibración. Para ello, fueron reservados dos tramos, los cuales proporcionaron 18 secciones homogéneas, las cuales no fueron consideradas en la etapa de calibración. Para cada una de éstas se simuló el desempeño de la estructura a lo largo de su periodo de servicio, considerando los factores de calibración obtenidos previamente, obteniéndose así los deterioros a distintas edades del pavimento. Éstos fueron comparados con las mediciones en campo, como puede distinguirse en la Figura 4.

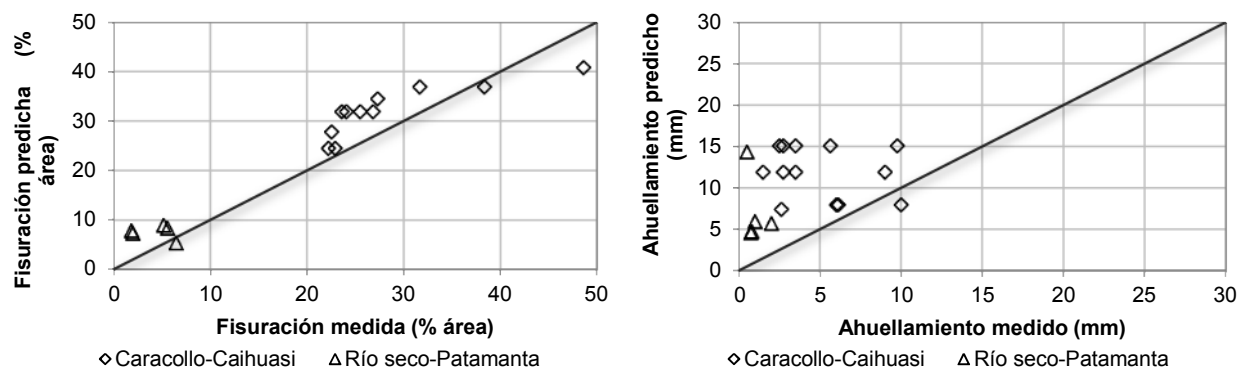


Figura 4: Deterioros estimados en tramos de validación considerando factores de calibración obtenidos en el estudio

En la figura anterior puede evidenciarse que la estimación de la fisuración es bastante precisa para la mayoría de las secciones, lo que permite afirmar que se cuenta con un modelo bastante adecuado para la estimación del deterioro. En cuanto al ahuellamiento, se observa que el deterioro aún es sobreestimado en la mayoría de las secciones consideradas, sin embargo, en algunas de ellas la estimación fue bastante próxima a la medición de campo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio son bastante alentadores ya que permitieron mejorar sustancialmente la estimación de los deterioros considerados. Éstos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Factores de calibración local obtenidos en el presente estudio

Deterioro		Factor de calibración	
Fisuración piel de cocodrilo	Modelo de fatiga	β_{f1}	0.9792
		β_{f2}	0.8000
		β_{f3}	0.8000
	Función de transferencia	C_1	0.9347
		C_2	0.9897
Ahuellamiento	Capa asfáltica	β_{1r}	$-0.426 + (6.75E-9)Mr_{sr}^2 - (3.21E-10)(Edad * Mr_{sr})$
		β_{2r}	1.0000
		β_{3r}	1.0000
	Granulares	$\beta_{s1(bases)}$	0.9000
	Subrasante	$\beta_{s1(subrasante)}$	$13.12 + 0.93Edad + (8.49E-4)Mr_{sr} + 0.0185Edad^2 + (1.40E-8)Mr_{sr}^2 + (2.79E-5)(Edad * Mr_{sr})$
Donde: Edad = Edad del pavimento en la fecha de medición del deterioro (años), Mr_{sr} = Módulo resiliente de la subrasante (Psi).			

La fisuración predicha mediante los modelos calibrados llega a ser bastante precisa, como puede distinguirse en el apartado de validación, por lo cual se puede decir que se cuenta con un modelo confiable para estimar este deterioro en la región. Por otra parte, si bien se mejoró la estimación del ahuellamiento mediante la calibración de los modelos, el deterioro estimado aún presenta cierta imprecisión, debiendo tomarse esto en cuenta en caso de emplear el modelo. Finalmente, se recomienda ampliar el estudio considerando las distintas regiones de Bolivia.

REFERENCIAS

- AASHTO. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice. Interim Edition*. 2008. ISBN: 978-1-56051-423-7.
- Huang, Yang. *Pavement Analysis and Design. Second Edition*. Prentice Hall. Pearson Education Inc. NJ. EEUU, 2004. ISBN: 0-13-142473-4.
- NCHRP. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP Project 1-37A, Final Report*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 2004.
- Rojas, Orlando. *Calibración de los modelos de deterioro de pavimentos flexibles de la nueva Guía AASHTO de diseño mecanístico-empírico para las condiciones del altiplano boliviano*. Profesor Guía: Christian O. Rojas T. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia, 2013.