

MODELACIÓN INCREMENTAL DE DETERIOROS EN PAVIMENTOS DE HORMIGÓN: UNA APLICACIÓN AL ESCALONAMIENTO

DEVELOPMENT OF INCREMENTAL DISTRESS EQUATIONS FOR CONCRETE PAVEMENTS: AN APPLICATION TO MODEL TRANSVERSE JOINT FAULTING

Por / By Marcelo Bustos, Hernán de Solminihac, Michael Darter, Juan P. Covarrubias

Resumen

Este artículo describe una metodología integral para desarrollar modelos incrementales de predicción del deterioro en pavimentos, que resultan muy convenientes al evaluar pavimentos en servicio. Dicha metodología es posteriormente aplicada a la modelación del escalonamiento en juntas transversales, sin barras de traspaso de cargas, de pavimentos de hormigón. En este estudio pudo apreciarse que los modelos obtenidos mediante regresión estadística de datos incrementales de deterioro resultaron capaces de simular la evolución del deterioro de una manera bastante similar a la que se puede lograr mediante el uso de modelos absolutos, aunque con mayores limitaciones a causa de una incidencia más pronunciada de diferentes fuentes de error y de la falta de suficiente información sobre la progresión del deterioro en los pavimentos.

Palabras claves: Gestión de pavimentos, pavimentos de hormigón, comportamiento de pavimentos, ecuaciones incrementales, modelos de deterioro

Abstract

This paper briefly describes a global methodology to develop incremental equations for pavement distress prediction, which are very useful to evaluate in-service pavements. Such methodology is subsequently applied to model transverse joint faulting in concrete pavements, considering joints without dowelbars. The results show that models obtained from statistical regression of incremental distress data, compared with absolute distress models, seem to have very similar capacities to simulate distress progression. However, the incremental equations developed in this study have many limitations caused by a large incidence of different error sources and by the lack of enough information of distress progression in the observed pavements.

Keywords : Pavement management ; concrete pavements; pavement performance; incremental models, distress models.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de predicción del deterioro en pavimentos son una herramienta de suma importancia para realizar adecuadas evaluaciones técnicas y económicas a lo largo de la vida útil de dichos pavimentos. El modelo HDM-4 del Banco Mundial recientemente desarrollado (Odoki y Kerali, 2000), como así también la versión anterior HDM-III, ampliamente usada para evaluaciones de pavimentos asfálticos en países en desarrollo durante los últimos años (Watanatada et al., 1987), contienen ecuaciones de predicción que predicen el incremento anual del deterioro en función de las características del pavimento, deterioro existente y solicitaciones aplicadas (tránsito, clima).

En pavimentos de hormigón, los modelos desarrollados más recientemente son absolutos, es decir que predicen el deterioro acumulado desde el inicio de la vida útil del pavimento. (Darter et al., 1985) (Smith et al., 1990) (Thompson et al., 1992). Los modelos incluidos en HDM-4 también se basan en ecuaciones absolutas, cuya aplicación en pavimentos en servicio se ejemplifica en la Figura 1, (Yu et al., 1997) (FICEM, 1996).

Los modelos incrementales presentan algunas ventajas sobre los modelos absolutos, como por ejemplo que no requieren conocer la estimación del tránsito total acumulado en pavimentos en servicio, porque los modelos incrementales predicen aumentos del deterioro a partir de la condición actual y el tránsito futuro (Figura 1). Tampoco precisan conocer la calidad de rodadura inicial del pavimento al finalizar su construcción. Este valor es muy influyente sobre la evolución posterior de la irregularidad longitudinal expresada en términos de IRI, que a su vez incide sensiblemente sobre los costos de operación vehicular (Chesher y Harrison, 1987).



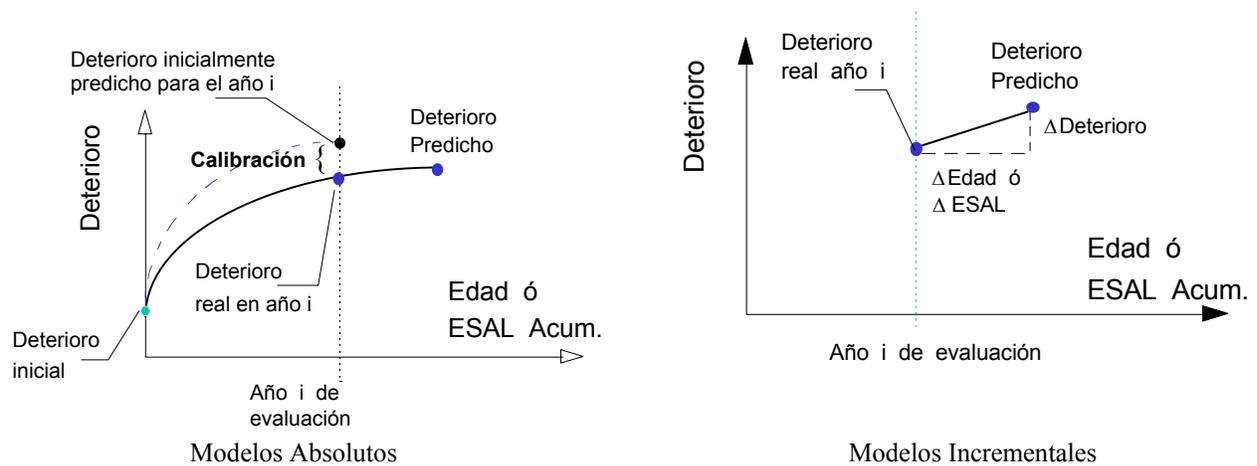


Figura 1. Distintos tipos de modelos de deterioro para evaluar pavimentos en servicio

Todas estas ventajas son importantes para los sistemas de gestión, ya que reducen la necesidad de información que frecuentemente no está disponible. Asimismo, los modelos incrementales son de más fácil adaptación a condiciones locales y modelación del deterioro después de la aplicación de actividades de conservación o rehabilitación de pavimentos.

Los principales objetivos del presente trabajo fueron los siguientes:

- Diseñar una metodología general para la obtención de ecuaciones incrementales de predicción de diferentes tipos de deterioro en pavimentos, basada en dos procedimientos alternativos: derivación de ecuaciones absolutas existentes, y desarrollo de nuevas ecuaciones mediante análisis estadístico.
- Aplicar la metodología diseñada a pavimentos de hormigón simple con juntas para desarrollar modelos de predicción de deterioros específicos, utilizando información provista por bases de datos internacionales.

En este artículo se presentan los principales resultados de la modelación de deterioros de tipos funcional, es decir que afectan directamente la calidad del servicio del pavimento, pero no son indicadores de falla estructural del pavimento como ocurre con el caso de las grietas.

2. METODOLOGÍA

La metodología general de desarrollo de ecuaciones incrementales de predicción del deterioro está compuesta por los siguientes pasos (Figura 2):

- a) Estudio de antecedentes disponibles: definición de pavimentos a analizar y tipos de deterioro a modelar.
- b) Desarrollo de modelos incrementales de deterioro empleando dos procedimientos alternativos:
 - Derivación matemática de modelos existentes de deterioro absoluto respecto del tiempo, para obtener el incremento de deterioro como un diferencial;
 - Modelación directa de los incrementos de deterioro utilizando información provista por las bases de datos, empleando técnicas estadísticas de regresión.
- c) Selección de modelos mediante estudio comparativo de bondad de ajuste, análisis de sensibilidad, variables incorporadas, etc.
- d) Proposición de una metodología de calibración que permita ajustar la predicción de la progresión del deterioro según condiciones locales de los pavimentos.



Los modelos de predicción del deterioro en pavimentos de hormigón analizados en este estudio, y modelos de tipo incremental en pavimentos asfálticos, se citan a continuación:

- Modelos absolutos de predicción del deterioro:

Se analizaron los modelos COPES (Concrete Pavement Evaluation System) (Darter et al., 1985); Proyecto NCHRP 1-26, "Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedures for Pavements" (Thompson et al., 1992); RIPPER '90 (Smith et al, 1990); SHRP (Rauhut y Darter, 1993); RIPPER '95 (Yu et al., 1997), y modelos desarrollados en Chile (Poblete et al, 1990).

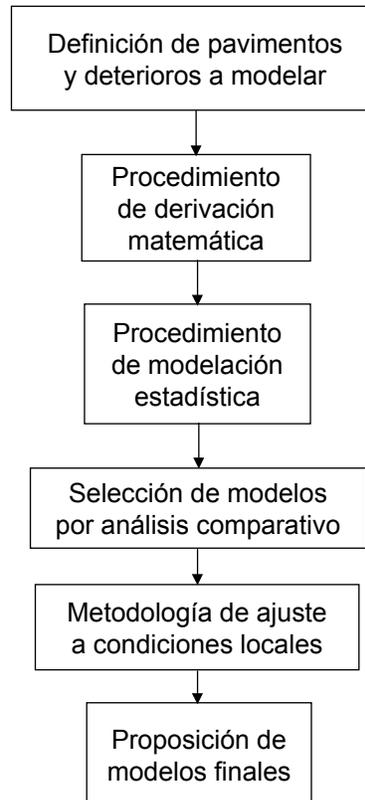


Figura 2. Esquema de la metodología global de obtención de modelos incrementales

- Modelos incrementales de predicción del deterioro:

En los modelos HDM-III para pavimentos asfálticos, la modelación se basó en una metodología fundamentalmente empírica, pero incorporando en algunos casos teoría mecanicista y conocimiento experimental de los materiales, con la siguiente forma general:

$$\Delta(\text{deterioro futuro}) = f(\text{condición actual, cargas y volumen de tránsito, resistencia del pavimento, clima, conservación aplicada})$$

Se incorporaron dentro de la modelación el agrietamiento, la pérdida de áridos, los baches, el ahuellamiento y el IRI (Paterson, 1987). Con algunos cambios y la incorporación del análisis de otros deterioros, tales como la rotura de borde y el agrietamiento por razones térmicas, la misma base conceptual se utiliza en los nuevos modelos HDM-4 (Odoki y Kerali, 2000).

También existen antecedentes sobre modelos incrementales en pavimentos de hormigón, como los desarrollados por Lee (1993) para indicadores de serviciabilidad de pavimentos, y Vidal (1998) para modelar el comportamiento de pavimentos de hormigón después de la aplicación de actividades de conservación o rehabilitación.



3. PRINCIPALES ETAPAS DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

3.1 Derivación de modelos incrementales a partir de modelos existentes

- a) *Selección de modelos absolutos:* El proceso de selección debe considerar el espacio de inferencia de los modelos analizados, los indicadores de bondad de ajuste, el análisis de sensibilidad, el año de desarrollo del modelo, etc. Por lo general, los modelos más modernos recogen la experiencia acumulada por las anteriores investigaciones, mejorando y actualizando los conceptos que sustentan las ecuaciones de predicción del deterioro.
- b) *Derivación matemática respecto del tiempo:* Esta operación consiste en diferenciar la expresión completa de la función de deterioro respecto del tiempo. En general, la mayor parte de las variables incorporadas presenta valores que se asumen como constantes, o con variación poco significativa a lo largo del tiempo. Las variables consideradas como dependientes del tiempo son el tránsito acumulado, otros indicadores de deterioro que influyan sobre el deterioro que se está analizando (por ejemplo, la presencia de baches en un pavimento asfáltico es muy influyente sobre el IRI), y por supuesto la edad del pavimento.
- c) *Comparación entre predicción de modelos absolutos e incrementales derivados:* Se debe verificar que los valores predichos por el modelo incremental no sean significativamente distintos a los que se calculan por el modelo absoluto, para que el modelo incremental sea, desde el punto de vista práctico, al menos tan bueno como el modelo absoluto original.

3.2 Modelación de los deterioros aplicando análisis estadístico

La metodología de modelación estadística consta de diversas etapas que se describen a continuación:

- a) *Definición y procesamiento de las bases de datos a utilizar:* Para modelar incrementos de deterioro es necesario disponer de fuentes de información que deben contar con datos de sucesivas mediciones de deterioro de los pavimentos. La información debe ser confiable y haber sido recopilada bajo estrictos controles de consistencia y calidad.
- b) *Selección de las variables influyentes más importantes para cada modelo:* Para preseleccionar las variables potencialmente más influyentes en cada deterioro, se puede emplear un criterio similar al utilizado en el estudio SHRP (1993), que pondera la incidencia esperada de las variables escogidas utilizando criterio y experiencia.
- c) *Definición de las formas funcionales de los modelos incrementales de deterioro:* los modelos incrementales deben respetar en líneas generales las formas de evolución del deterioro que han sido ya ampliamente estudiadas en investigaciones previas. Aquí se puede analizar si es factible y conveniente la modelación de la evolución del deterioro en dos etapas: predicción del tiempo de inicio del deterioro y progresión posterior una vez iniciado.
- d) *Desarrollo de ecuaciones de predicción del deterioro:* el proceso general de obtención de los modelos utilizando regresión estadística incluirá las siguientes etapas:
 - Agrupación de los datos en tablas descriptivas, para definir rangos de aplicabilidad de los modelos que se desarrollen.
 - Análisis estadísticos univariados y multivariados, mediante evaluación de descriptores estadísticos y uso de técnicas gráficas.
 - Obtención de ecuaciones de predicción usando técnicas estadísticas de regresión no lineal y técnicas avanzadas de exploración de datos
 - Análisis de los valores de los indicadores estadísticos y de la calidad conceptual de los modelos (variables incorporadas, sensibilidad de los modelos, bondad de ajuste, etc.).
 - Incorporación de modificaciones al modelo y estimación de nuevas funciones, repitiendo el proceso las veces que se crea necesario, hasta terminar con la selección del modelo que parezca más adecuado para cada tipo de deterioro.

La Figura 3 representa en forma esquemática el procedimiento establecido para el desarrollo de modelos incrementales de predicción del deterioro.



3.3 Procedimiento de calibración de los modelos seleccionados

Una vez seleccionados los modelos incrementales que aparezcan como más adecuados, se pueden utilizar otras bases de datos para verificar el comportamiento de los modelos y ajustar los modelos. Calibrar un modelo de deterioro consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores numéricos que modifican la predicción del modelo, minimizando la diferencia entre las predicciones del modelo y un conjunto de datos de deterioro medidos en terreno. La calibración de los modelos de deterioro puede realizarse a dos niveles: para una carretera específica (nivel de proyecto), o bien para un grupo de caminos (nivel de red). En otras publicaciones se describe en detalle el procedimiento de calibración propuesto (Bustos, 1999).

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE

4.1 Derivación de modelos absolutos

En general, los modelos analizados en el presente estudio presentan formas funcionales muy similares para cada tipo de deterioro, que permiten una derivación respecto del tiempo relativamente simple desde el punto de vista matemático. Los modelos más recientes son los RIPPER '95 (Yu et al., 1997) desarrollados por la Federal Highway Administration, que incorporan la experiencia adquirida por los anteriores estudios. En algunos casos no presentan un ajuste estadístico superior al obtenido para otros modelos, pero incluyen mayor cantidad de variables, lo que permite disponer de un espacio de inferencia y aplicación más amplio. Además, estos modelos han sido incorporados en el modelo HDM-4 del Banco Mundial (Odoki y Kerali, 2000), lo cual les confiere una relevancia internacional superior a los restantes modelos.



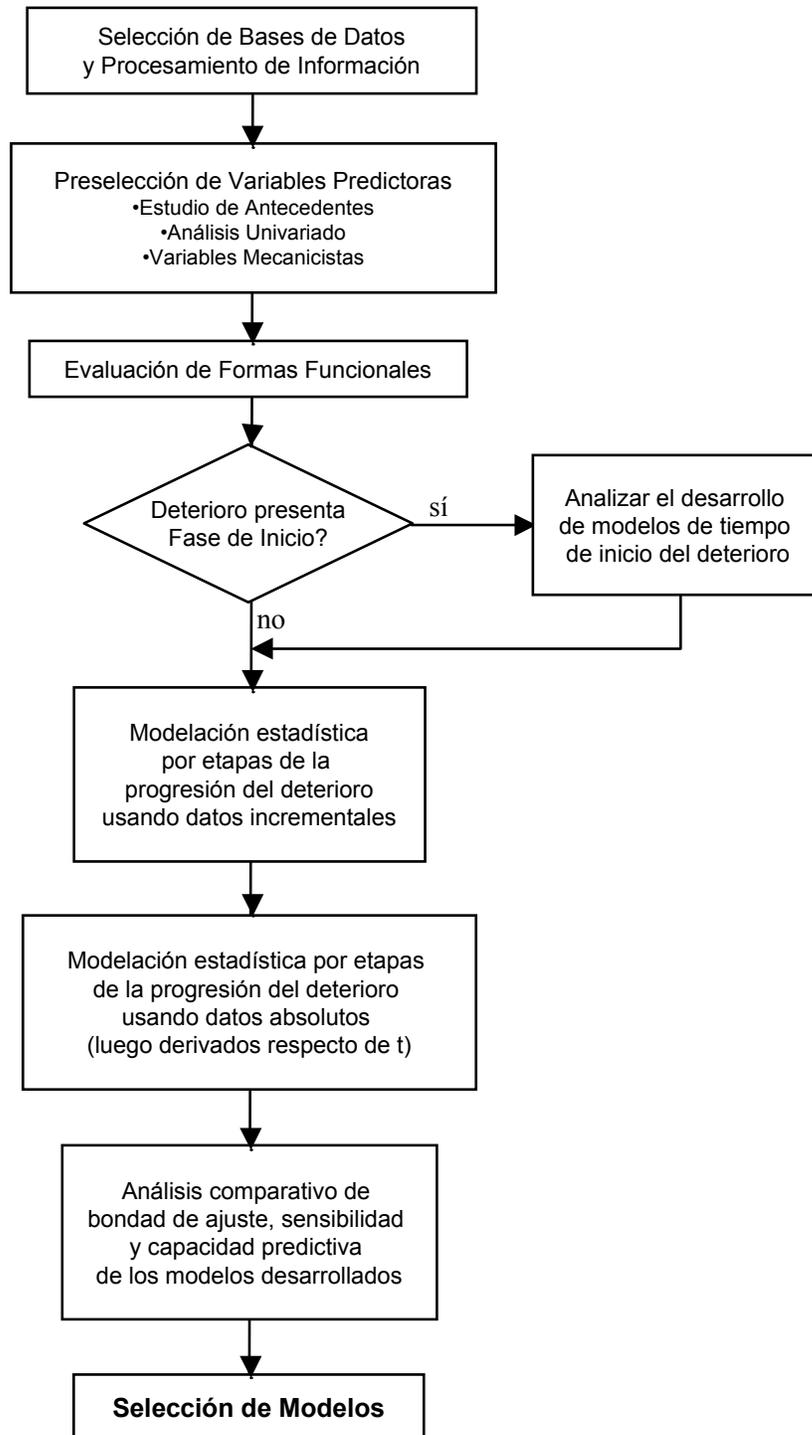


Figura 3. Metodología de modelación estadística de ecuaciones incrementales



En consecuencia, se decidió seleccionar a los modelos RIPPER '95 para la aplicación del procedimiento de derivación de ecuaciones incrementales en pavimentos de hormigón simple con juntas (JPCP). Respecto al escalonamiento de juntas transversales en JPCP sin barras de traspaso de cargas, el modelo seleccionado es el siguiente:

$$\text{FaultND} = \text{CESAL}^{0.25} (0.2347 - 0.1516 \text{ Cd} - 0.00025 \text{ Thick}^2 / \text{Avjspace}^{0.25} - 0.0115 \text{ Basetype} + 0.778 \times 10^{-7} \text{ FI}^{1.5} \text{ Precip}^{0.25} - 0.002478 \text{ Days90}^{0.5} - 0.0415 \text{ Widlane}) \quad (1)$$

donde:

FaultND	=	escalonamiento absoluto en juntas sin barras, en pulgadas
Thick	=	espesor de la losa de hormigón, pulg.
Days90	=	días al año con temperatura ambiente máxima superior a 90 °F (32 °C)
CESAL	=	ejes equivalentes de 18-kip acumulados, millones
Cd	=	coeficiente de drenaje AASHTO
Avjspace	=	promedio de espaciamiento de juntas transversales, pies
Basetype	=	tipo de base (0, No estabilizada; 1, Estabilizada)
FI	=	índice de Congelamiento, °F-día
Precip	=	precipitación promedio anual, pulg.
Widlane	=	sobrecancho de calzada (0, Sin sobrecancho; 1, Con sobrecancho)

Llamando K_3 a toda la expresión encerrada entre paréntesis en la Ecuación 1, independiente del tiempo, y aplicando el procedimiento de derivación descrito, se llega a modelar el escalonamiento en JPCP sin barras de la siguiente forma:

- El escalonamiento en el primer año después de construcción se calcula utilizando la ecuación absoluta del deterioro, es decir:

$$\text{FaultND}_1 = (\Delta\text{ESAL}_1)^{0.25} K_3 \quad (2)$$

- Para los años subsiguientes, se calcula el incremento anual correspondiente del deterioro mediante la expresión:

$$\Delta\text{FaultND} = 0.25 K_3 \Delta\text{ESAL}_i^{0.25} \cdot t^{(-0.75)} \quad (3)$$

y el escalonamiento acumulado al final de cada año para JPCP sin barras de traspaso de cargas se calcula como en el caso anterior:

$$\text{FaultND}_f = \text{FaultND}_a + \Delta\text{FaultND} \quad (4)$$

Aplicando la metodología de derivación especificada, se logran modelos incrementales cuyo ajuste respecto a la ecuación original absoluta es muy elevado. El modelo de escalonamiento incremental presenta alguna diferencia respecto al modelo absoluto debido a la aproximación en la estimación de los ejes acumulados, pero esta diferencia es de magnitud muy pequeña. Respecto al modelo de deterioro de juntas, el ajuste entre el modelo absoluto y su versión incremental derivada es prácticamente total. La Figura 4 muestra un ejemplo de evolución del escalonamiento en JPCP sin barras. En general, no hay diferencias importantes entre los modelos incrementales y absolutos, lo cual valida el procedimiento utilizado.



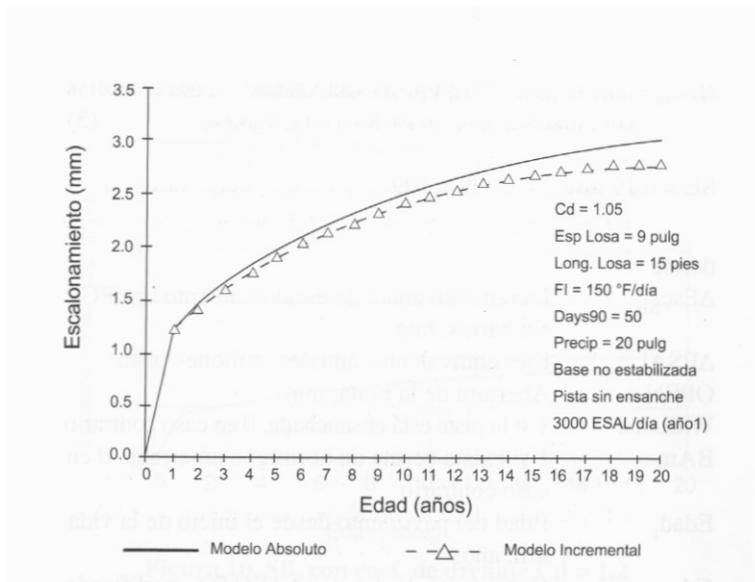


Figura 4. Comparación entre modelo absoluto e incremental derivado, escalonamiento en JPCP sin barras de traspaso de cargas

4.2 Modelos incrementales obtenidos por regresión estadística de incrementos de deterioro

Se utilizaron las siguientes bases de datos para la modelación estadística:

- Base de datos SHRP-LTPP, de la FHWA: con cerca de 120 secciones JPCP, contiene gran cantidad de información que se actualiza continuamente, e incorpora pavimentos JPCP con variadas características y condiciones.
- Base de datos RIPPER '95: preparada por ERES Cons., para la FHWA. Contiene datos de 95 pavimentos JPCP que fueron evaluados en 1987 (estudio RIPPER '90), y luego en 1992. Provee información recopilada bajo estrictos controles de calidad.

Se realizó un estudio estadístico sobre las poblaciones de ambas bases de datos, para verificar que no existieran diferencias sistemáticas estadísticamente significativas entre las mismas. Del mismo no pudo inferirse con claridad que las bases de datos no pudieran utilizarse en forma conjunta para la modelación del escalonamiento de juntas transversales, por lo cual se decidió utilizarlas en forma unificada. Se determinaron los incrementos de deterioro a partir de la información de mediciones sucesivas disponible para varias secciones, utilizando linealización de tendencias de evolución en caso de disponer de más de dos mediciones.

Para la modelación de los incrementos de escalonamiento en función de potenciales variables explicativas se utilizaron técnicas de exploración de datos tanto convencionales como avanzadas, aplicando la metodología establecida, pero los mejores resultados se obtuvieron utilizando regresión no lineal de los incrementos de deterioro. Las formas funcionales tentativas de las ecuaciones de predicción para los modelos no lineales se asumieron con una estructura similar a la de los modelos RIPPER '95.



El modelo incremental desarrollado se presenta a continuación:

$$\Delta Esc_{SB} = (\Delta ESAL/Edad)^{0.485} \text{ EXP } [0.643 (\text{OPEN}/Edad)^{0.5} - 2.09 \text{ Cd} + 0.0158 \text{ DcP} - 0.0035 \text{ EspLosa} - 0.496 \text{ BAm} - 0.97 \text{ Widlane}] \quad (5)$$

SE = 0.19 mm ; N = 109

donde

ΔEsc_{SB}	:	Incremento anual de escalonamiento en JPCP sin barras, mm
$\Delta ESAL_i$:	Ejes equivalentes anuales, millones/pista
OPEN	:	Abertura de la junta, mm
WidLane	:	1 si la pista está ensanchada, 0 en caso contrario
BAm	:	1 si existe berma de hormigón amarrada, 0 en caso contrario
Edad _i	:	Edad del pavimento desde el inicio de la vida útil, años
Cd	:	Coefficiente de drenaje AASHTO, modificado según RIPPER '95.
DcP	:	Días al año con precipitaciones de más de 5 mm
EspLosa	:	Espesor (mm) de la losa.
OPEN	=	$0,0394 C \text{ LonLosa} (0,5 \square \text{ TRG} + \square_s) \text{ [mm]}$ (Smith et al, 1990)
C	:	Coefficiente de ajuste por restricción de sub-base
C	=	0,65 para base estabilizada
C	=	0,80 para base granular
Lonlosa	:	Longitud de losa en pulgadas
α	:	Coef. de contracción térmica del hormigón, se adopta $5,5E-6 \text{ } \epsilon/^{\circ}\text{F}$
TRG	:	Rango medio de temperaturas ambientales
ϵ_s	:	Coefficiente de retracción del hormigón, adoptado $1,5 \times 10^{-4}$

5. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MODELOS DESARROLLADOS

El análisis de sensibilidad efectuado en este caso se realizó en base a los siguientes valores de variables considerados como situación base (SB):

Tránsito pesado	:	2000 ESAL/día en el primer año
Tasa de crecimiento	:	3% anual
Mod. Elástico horm.	:	27560 Mpa (4×10^6 psi)
Espesor de losa	:	0,229 m (aprox. 9 pulgadas)
Mód. Estático Subrasante	:	55,56 Mpa/m
Long. de losa	:	4,5 m
Coef. de drenaje Cd	:	1
Tipo de base	:	granular
Pista de ancho estándar (3,65 m), con berma asfáltica (Widlane = BAm = 0)		

Los valores adoptados para las variables climáticas consideradas se presentan en la Tabla 1, donde se definen tanto la situación base como valores representativos de dos climas opuestos, seco sin congelamiento y húmedo con congelamiento.



Tabla 1. Valores de parámetros climáticos usados en el análisis de sensibilidad

Clima	ICong	CicHD	DTS32	Prec	TRG	DcP
Seco sin Cong.	0	10	60	200	20	25
Situación base	50	30	30	700	30	75
Húm. con Cong.	500	80	15	1200	40	130

ICong: Índice de Congelamiento, °C/d (corresponde a Freezing Index FI)

CicHD: Ciclos anuales de congelamiento-descongelamiento

DTS32: Días con temperatura superior a 32 °C

Prec: Precipitaciones anuales, mm

TRG: Rango de temperaturas (diferencia entre máxima media del mes más caluroso y mínima media del mes más frío), °C

DcP: Días con precipitaciones mayores que 5 mm

En las Figuras 5 a 10 se observa una comparación de la sensibilidad respecto a las variables más importantes de los modelos MIESB1 y RIPPER derivado.

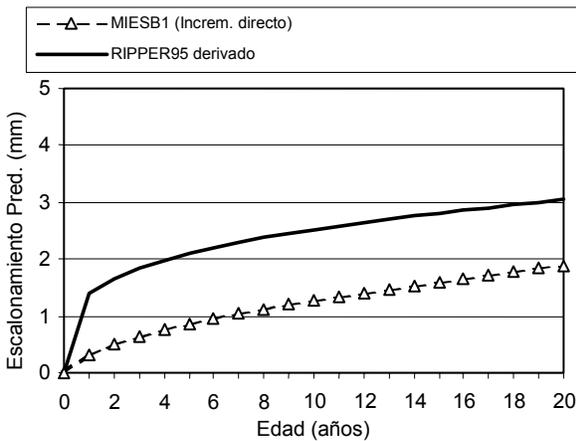


Figura 5. Situación Base (SB)

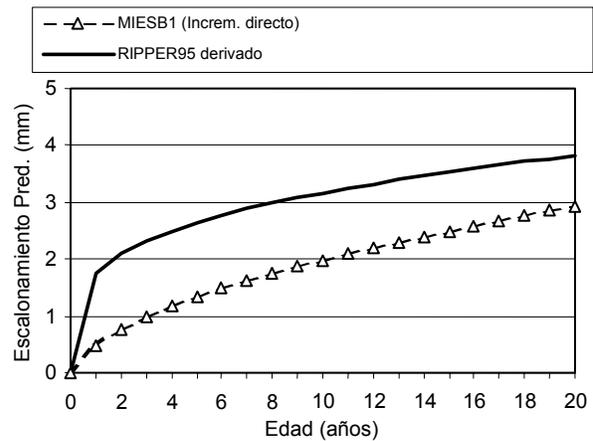


Figura 6. SB, con tránsito de 5000 ESAL/día

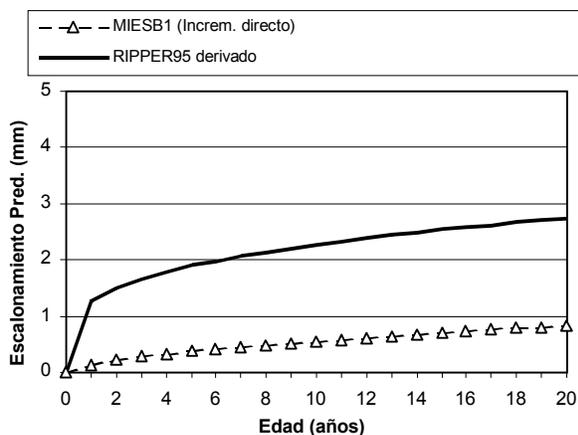


Figura 7. SB, clima seco sin congelamiento

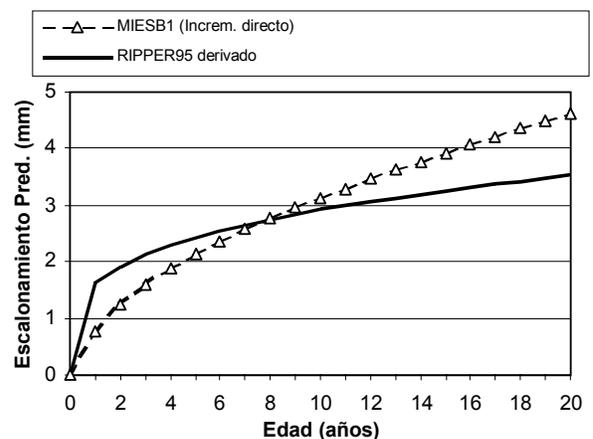


Figura 8. SB, clima húmedo con congelamiento



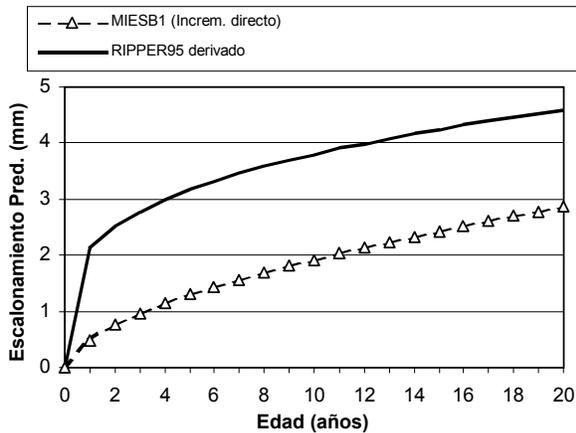


Figura 9. SB, con coef. de drenaje $C_d = 0.8$

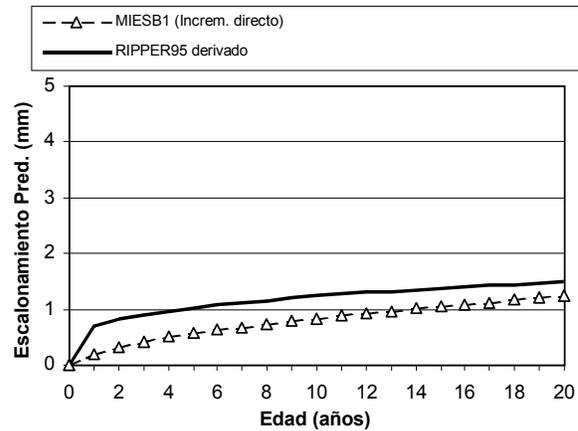


Figura 10. SB, con coef. de drenaje $C_d = 1.2$

5.1 Principales características del modelo incremental MIESB1

Uno de los aspectos más importantes de este modelo (Ecuación 5) es que la incidencia del tránsito sobre los incrementos de escalonamiento no es la misma a lo largo de la vida útil del pavimento, como lo indica la incorporación de la variable $\Delta\text{ESAL}/\text{Edad}$. A medida que transcurre el tiempo, una misma cantidad de ESAL tiene menor incidencia sobre el incremento del escalonamiento.

También es destacable la incidencia de la variable formada por la relación OPEN/Edad , que muestra que la incidencia de la abertura de juntas máxima estimada decrece en el tiempo. Este resultado estadístico corrobora los resultados de investigaciones anteriores. En un pavimento de hormigón sin barras de traspaso de carga en las juntas transversales, la transferencia de cargas está a cargo principalmente de la trabazón mecánica en los áridos sobresalientes en las caras de la junta (“interlocking”). Dicha transferencia de carga, debido al movimiento constante de expansión, contracción y alabeo de la junta, se va reduciendo progresivamente a través del tiempo debido al desgaste y deterioro en las caras de la junta, hasta que alcanza un valor residual (Poblete et al., 1990).

Una mayor abertura de juntas contribuye a que exista una menor transferencia de cargas, generando mayores posibilidades de aparición de escalonamiento, pero de acuerdo al modelo MIESB1 desarrollado la incidencia específica de la abertura de junta sobre el incremento del escalonamiento es decreciente en el tiempo, indicando que se tiende a alcanzar una capacidad residual de transferencia de carga. Lo anterior equivale a decir que aunque a lo largo del tiempo el crecimiento del tránsito fuese tal que el valor de la variable $\Delta\text{ESAL}/\text{Edad}$ se mantuviera constante, de todas formas los sucesivos incrementos de escalonamiento irían decreciendo en el tiempo debido a la progresiva estabilización de la transferencia de carga en torno a un valor residual.

Respecto a las restantes variables incorporadas en el modelo MIESB1, el análisis de sensibilidad muestra resultados consistentes con la experiencia. La influencia de la longitud de losas está representada indirectamente a través de la abertura de juntas (OPEN). También un mayor espesor de la losa contribuye a reducir el incremento del escalonamiento. Ninguna de estas últimas variables tiene una incidencia muy notoria sobre la magnitud de los incrementos, tal como lo indica la experiencia previa. Las cargas de tránsito expresadas en ESAL anuales, en cambio, sí tienen una influencia destacada sobre los incrementos, según indica el análisis de sensibilidad mostrado en las Figuras 5 y 6.

El coeficiente de drenaje, por su parte, tiene gran influencia sobre los incrementos de escalonamiento, como se puede observar en las Figuras 9 y 10, aumentando la magnitud de los mismos cuando las condiciones de drenaje son pobres. Aunque no se muestran en las figuras, el soporte lateral brindado por la berma de hormigón amarrada a la calzada también contribuye significativamente a reducir el deterioro, y lo mismo ocurre cuando la pista es ensanchada. La incidencia en este caso prácticamente se duplica en cuanto a la reducción del incremento de deterioro respecto a la colocación de berma amarrada como puede verse en sus respectivos coeficientes en el modelo.

Finalmente, las condiciones de humedad representadas a través de los días con precipitaciones superiores a 5 mm presentan suma importancia en la evolución del deterioro (Figuras 7 y 8). Esta incidencia puede ser bastante exagerada respecto a la realidad, debido a que en muchos pavimentos situados en zonas húmedas se han registrado incrementos bastante significativos, sin estar asociados a tránsito muy elevado u otras características desfavorables que pudieran ser la causa de dichos incrementos. En estos casos, el modelo ha asociado como causa principal al clima húmedo, y de allí la gran incidencia de este factor registrada en el modelo MIESB1. La base SHRP-LTPP



contiene la mayoría de las secciones que han presentado dicho comportamiento, lo cual coincide con los resultados de modelos desarrollados con dichos datos donde las precipitaciones resultaron muy influyentes sobre el escalonamiento (Rauhut y Darter, 1993).

Deben tomarse estos resultados con precaución, y evaluar el comportamiento del modelo antes de aplicarlo en climas húmedos. Asimismo, no es conveniente aplicar el modelo para condiciones de tránsito muy elevado, ya que la gran mayoría de las secciones registró tránsitos anuales no superiores a 2×10^6 ESAL, por lo cual el modelo debería validarse con más datos antes de extrapolar su predicción fuera de estos rangos.

5.2 Comparación entre los modelos desarrollados

Analizando los gráficos mostrados en las figuras 5 a 10, se puede observar que casi en todos los casos el modelo MIESB1 predice menor escalonamiento absoluto que el modelo RIPPER '95 derivado. La predicción de escalonamiento más reducido se debe principalmente a la falta de datos sobre escalonamiento en pavimentos durante los primeros tres años de la vida útil de los mismos, lo que no permite registrar el "salto" inicial que indican la mayoría de los modelos absolutos analizados.

Pero el modelo MIESB1 tiene un comportamiento bastante mejor en lo que se refiere a la predicción específica de incrementos de escalonamiento en pavimentos en servicio. Al observar la evolución de las curvas de deterioro de los modelos RIPPER derivado y MIESB1 en los gráficos del análisis de sensibilidad se puede apreciar un notable paralelismo entre ambas en la gran mayoría de los casos. Es decir que partiendo de algún valor de escalonamiento medido en terreno, la predicción posterior del modelo MIESB1 sería bastante similar a la del modelo RIPPER '95 utilizado como modelo incremental

Si bien puede mostrar en algunos casos predicciones exageradamente elevadas para condiciones climáticas muy húmedas, MIESB1 resulta un modelo incremental bastante aceptable en muchos aspectos, pero no es recomendable utilizarlo como modelo absoluto para la evaluación de pavimentos muy nuevos o proyectos de pavimentación, por las limitaciones que presenta para predecir escalonamiento absoluto.

Finalmente, un aspecto destacable del modelo MIESB1 es que la presencia de berma de hormigón amarrada a la calzada resulta significativamente influyente desde el punto de vista estadístico, lo cual no ocurre en el modelo RIPPER '95 derivado.

5.3 Evaluación de errores en la predicción de los modelos analizados

Como una forma de verificar la capacidad predictiva de los modelos, se presentan en la Tabla 2 los valores de error medio en la predicción de ambos modelos al ser comparada su predicción de incrementos de escalonamiento y de escalonamiento absoluto con información provista por la base de datos COPES

Tabla 2. Errores medios en la predicción, información provista por base de datos COPES

Modelos Desarrollados	Error Medio de Predicción (EMP) de modelos usados para estimar	
	Incrementos Totales	Escalonamiento Absoluto
MIESB1 incremental	0.55 mm	1.92 mm
RIPPER '95 derivado	0.35 mm	1.08 mm

El modelo que menor error presenta, comparado con la información provista por la base de datos COPES, es el RIPPER '95 derivado. Este análisis otorga una pequeña ventaja al modelo RIPPER derivado respecto al modelo MIESB1, con una mayor capacidad general para predecir el deterioro analizado y sus incrementos.

6. CONCLUSIONES

El modelo RIPPER '95 derivado, desde una perspectiva general, parece ser el más adecuado de los modelos analizados, de acuerdo a la metodología diseñada. Sin embargo, el modelo incremental MIESB1 también presenta un comportamiento bastante aceptable al ser utilizado para la evaluación de pavimentos en servicio, aún unos pocos años después de la construcción, salvo cuando las condiciones climáticas son muy húmedas.



Los incrementos de deterioro predichos muestran la incidencia de las variables explicativas en una forma muy similar a la que presentan los modelos absolutos. Pero no debe esperarse que los modelos incrementales directamente obtenidos sean capaces de modelar el comportamiento de los pavimentos mejor que los modelos absolutos, debido principalmente a las limitaciones en disponibilidad y calidad de los datos, que presentan considerable influencia sobre los resultados obtenidos.

Los modelos incrementales son útiles especialmente cuando se aplican al análisis de pavimentos en servicio donde la información sobre el pasado del pavimento y de su tránsito es escasa o nula. Mejores modelos podrán ser desarrollados en la medida que se disponga de secuencias más prolongadas de mediciones del deterioro para cada pavimento.

7. REFERENCIAS

- BUSTOS, M. (1999), "Metodología de desarrollo y utilización de modelos incrementales de predicción del deterioro en caminos, y su aplicación a pavimentos de hormigón". Tesis de Doctorado, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, 1999.
- CHESHER, A., y HARRISON, R., (1987), "Vehicle Operating Costs: Evidence from Developing Countries". World Bank, Transportation Department, Washington D.C., 1987
- DARTER, M., BECKER, J. M. y SNYDER, M. B., (1985) "Portland Cement Concrete Pavement Evaluation System – COPEs". NCHRP Report 277, Transportation Research Board, Washington D.C., 1985.
- FICEM (1996), "Evaluación Técnica y Económica de Pavimentos Basada en HDM". Grupo de Estudio Latinoamericano, Federación Interamericana del Cemento.
- IDIEM - D.N.V., (1989); "Control y Seguimiento de Pavimentos de Hormigón: Informe Final". Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales de la Universidad de Chile y Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Santiago de Chile, 1989.
- LEE, YING-HAUR (1993), "Development of Pavement Prediction Models". PhD Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993.
- ODOKI, J. B., y KERALI, H.G.R. (2000), "Analytical Framework and Model Descriptions". The Highway Development and Management Series, Volume 4. World Road Association (PIARC) and The World Bank. January 2000.
- PATERSON, W., (1987), "Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management". World Bank, Transportation Department, Washington D.C., 1987.
- POBLETE, M.; GARCÍA, A., DAVID, J., CEZA, P. y ESPINOZA, R. (1990), "Moisture Effects on the Behaviour of PCC Pavements". Presented to 2nd. International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements. Siquenza, Spain, 1990.
- RAUHUT, B. y DARTER, M. (1993), "Sensitivity Analyses for Selected Pavement Distresses", SHRP-P-393, Strategic Highway Research Program, National Research Program, Washington, D.C. 1993.
- SHRP (1993) Sensitive Analyses for Selected Pavement Distresses, SHRP-P-393, Strategic Highway Research Program, National Research Program, Washington, D.C.
- SMITH, K.D., PESHKIN, D.G., DARTER, M.I., MUELLER, A.L. Y CARPENTER, S.H. (1990), "Performance of Jointed Concrete Pavements, Vol. III Summary of Research Findings". Reporte N° FHWA-RD-89-138 ERES Consultants Inc., Illinois, USA, november 1990.
- THOMPSON, M.R., ET AL. (1992), "Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedures for Pavements". Draft Report, NCHRP 1-26, T. R. B., Washington, D.C., USA, 1992.
- VIDAL, MARIANA (1998), "Modelos de deterioro incrementales de segunda fase para pavimentos de hormigón". Tesis de Magíster, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 1998
- WATANATADA ET AL. (1987), "The Highway Design and Maintenance Standards Model: Vol I". World Bank, Transportation Department, Washington D.C., 1987.
- YU, H.T., SMITH, K.D., DARTER M.I., JIANG J. AND KHAZANOVICH L. (1997), "Performance of Concrete Pavements, Vol. III: Improving Concrete Pavement Performance". Reporte N° FHWA-RD-95-111 ERES Consultants Inc., Illinois, USA., December 1997.



Marcelo Bustos

*Profesor Adjunto Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña
Universidad Nacional de San Juan
Argentina*

*Professor School of Engineering of Mountain Roads
Universidad Nacional de San Juan
Argentina
mbustos@eicam.unsj.edu.ar*

Hernán de Solminihac

*Ingeniero Civil, Magister en Ciencias 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*

Michael I. Darter

*Senior Principle Engineer
ERES Cons. A Division of ARA, Inc.
Champaign, Illinois, U.S.A.*

Juan P Covarrubias

*Gerente General
Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile
Santiago, Chile*

*General Manager
Chilean Cement and Concrete Institute
Santiago, Chile
jpcovarrubias@ich.cl*

