

ECUACIONES INCREMENTALES DE IRI PARA PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE CON JUNTAS

IRI INCREMENTAL EQUATIONS FOR JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENTS

Por / By Marcelo Bustos, Anibal Altamira, Hernán de Solminihac, Michael Darter, Juan Pablo Covarrubias

Resumen

Este artículo presenta un estudio de las relaciones entre los deterioros incrementales y el incremento del IRI utilizando tanto simulación como regresión empírica. El análisis de simulación permitió verificar una relación del tipo lineal entre el IRI y el escalonamiento de juntas y la cantidad de juntas transversales con media y alta severidad en su deterioro. Dicha relación fue también validada por los modelos empíricos obtenidos por regresiones estadísticas. En el modelo propuesto finalmente incorpora además el efecto de la edad del pavimento y del deterioro de grietas existentes. Así, dicho modelo y el sistema de administración de pavimentos no requiere conocer el valor inicial del IRI inmediatamente después de construido el pavimento.

Palabras claves: IRI, escalonamiento, modelos de deterioro, pavimento de hormigón.

Abstract

This paper presents a study of the relationships between increments of distress and IRI by using both simulation analysis and empirical regression. The simulation analysis permitted to verify the linear relationship between IRI, cumulative faulting and quantity of spalled joints of medium and high severity, and this was also validated by the empirical models obtained by statistical regression. Additional effects due to age of the pavement and incidence of deterioration of existing cracks are considered in the model finally proposed, which does not need the value of initial IRI after construction to be used in pavement management systems.

Keywords: IRI, faulting, pavement performance, concrete pavements.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de la modelación del deterioro de pavimentos es establecer relaciones entre el deterioro y su efecto sobre los usuarios de las carreteras y sus vehículos. Considerando a la varianza del perfil longitudinal como el parámetro más importante para conocer la serviciabilidad o calidad de rodadura de un pavimento, se fueron desarrollando a través del tiempo numerosos dispositivos para medir la irregularidad longitudinal de los pavimentos, también conocida como "rugosidad". Los "rugosímetros de tipo respuesta", que entregan un valor representativo de la irregularidad longitudinal (BPR, NAASRA, Mays-meter, etc.), son aparatos relativamente económicos, pero requieren frecuente calibración y verificación de los dispositivos que registran la respuesta, y existe cierta dificultad para establecer correlaciones precisas entre las mediciones registradas con los diferentes dispositivos (Sayers, 1997).

Por su parte, el Índice Internacional de Rugosidad, comúnmente conocido como IRI (Sayers et al, 1986), es un indicador estadístico de la irregularidad superficial del pavimento, que se determina mediante un cálculo matemático realizado con las cotas del perfil longitudinal del camino. El IRI es un indicador ampliamente utilizado en el mundo vial en la actualidad; por ello, la obtención de buenos modelos de predicción de IRI y su calibración a datos de terreno, es una inquietud permanente entre los investigadores de pavimentos.

En el caso de los pavimentos de hormigón, hay comparativamente pocos antecedentes sobre modelos de evolución del IRI, respecto a lo que ha significado el estudio del IRI en el caso de pavimentos asfálticos. Para pavimentos de hormigón simple con juntas, en el estudio RIPPER '95 se desarrolló un modelo de IRI dependiente exclusivamente de indicadores de deterioro, principalmente escalonamiento y deterioro de juntas transversales (Yu et al, 1997); dichos modelos han sido incluidos en el sistema HDM4 del Banco Mundial (Odoki y Kerali, 2000). Otros modelos de IRI desarrollados son función exclusiva de tránsito, estructura, clima, edad, etc. (SHRP, 1993). En todos los casos, se trata de modelos de predicción de IRI absoluto, basado en mediciones realizadas en pavimentos reales.

El valor de IRI inicial de construcción (IRI_0) es un factor muy importante en los modelos de predicción de tipo absoluto, por la gran influencia que tiene sobre la magnitud de la predicción posterior de la rugosidad ya que los incrementos de IRI se van acumulando respecto a este valor remanente desde la construcción. El problema es que muy raras veces este valor está disponible como información, y siempre es mayor que cero. Los modelos absolutos analizados incorporan una constante que resulta de la regresión estadística, y que representa en forma genérica a este valor de IRI inicial, el cual puede ser muy variable en la realidad. Esto constituye una de las mayores limitaciones para el uso de modelos absolutos, y la principal motivación para desarrollar modelos de tipo incremental para la predicción del IRI, especialmente en pavimentos de hormigón donde no se ha desarrollado este tipo de modelos.

2. INCIDENCIA DE LOS DETERIOROS SOBRE EL IRI, SIMULADA MEDIANTE PERFILES PREDISEÑADOS

Este estudio presenta los principales resultados de un análisis estadístico orientado al desarrollo de un modelo empírico que permita predecir incrementos de IRI en pavimentos de hormigón simple con juntas. Se decidió modelar los incrementos de IRI principalmente en función de incrementos de deterioro superficial observados en terreno, en lugar de utilizar como variables independientes parámetros de tránsito, estructura y clima, ya que como se discute posteriormente, las causas directas de aumento de la irregularidad longitudinal en pavimentos de hormigón son los mismos deterioros superficiales. El tránsito, la estructura y el clima inciden en forma directa sobre el desarrollo de dichos deterioros, y sólo en forma indirecta sobre el IRI.

En los pavimentos de hormigón no se presenta el problema de deformación estructural debido a la rigidez de las losas, y los factores climáticos contribuyen al deterioro general en bastante menor grado que en el caso de pavimentos asfálticos. Dado un cierto valor de IRI inicial, que depende fundamentalmente de la calidad con que se haya ejecutado la construcción del pavimento de hormigón, el incremento de IRI se debe principalmente al aumento en la cantidad y severidad de los restantes tipos de deterioros, ya que son las causas directas de las irregularidades en la calidad de rodadura percibidas por el usuario.

Como una forma de verificar a través de análisis de simulación la incidencia de algunos tipos de deterioro sobre el IRI, y dado que el IRI se calcula a partir del perfil longitudinal de una carretera, se definió en el presente estudio una serie de perfiles teóricos de 1 milla (1609 km) de longitud, con diferentes longitudes de losa, y se consideraron por separado distintos valores de escalonamiento promedio y de porcentaje de juntas deterioradas para simular el efecto individual de cada uno de estos deterioros sobre el IRI.

La Figura 1 muestra los perfiles tipo utilizados, donde L es la longitud de losa (adoptada constante en cada caso) y E el valor de escalonamiento medio. Respecto al deterioro de juntas, se simuló como pequeñas depresiones en las juntas, con una profundidad media de 19 mm (0,75 in). La profundidad asumida para el deterioro es muy influyente sobre el valor de IRI calculado, pero se adoptó este valor como indicativo considerando que el "Distress Identification Manual" del Long Term Pavement Performance, LTPP (SHRP, 1993) no define la profundidad del deterioro de juntas transversales para los casos de media y alta severidad.

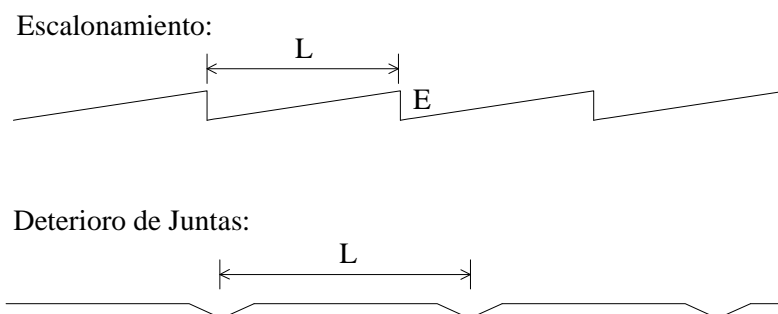


Figura 1. Tipificación de perfiles utilizados en el análisis de simulación.

Para la simulación se utilizó el programa Prof.exe, que permite calcular el IRI en una huella, a partir de un perfil definido por cotas o elevaciones (en pulgadas) separadas en forma equidistante 154,2 mm (6 in), a lo largo de toda la

longitud del perfil. El valor de IRI fue convertido a m/km. En la Tabla 1 se muestran los valores de IRI obtenidos para cada perfil teórico definido por una cierta longitud de losa y escalonamiento medio de juntas transversales.

Tabla 1. valores de IRI [m/km] obtenidos desde perfiles teóricos con escalonamiento de juntas.

Longitud Losa (m)	Escalonamiento Promedio (mm)			
	2	4	6	8
3,35	1.09	2.18	3.27	4.36
3,96	1.04	2.08	3.12	4.16
4,57	0.96	1.91	2.87	3.83
5,18	0.85	1.69	2.54	3.38
5,79	0.77	1.54	2.31	3.09

El análisis gráfico de los datos obtenidos y su variación en función tanto de las longitudes de losa como del escalonamiento promedio se presenta en las Figuras 2 y 3 respectivamente. Puede verse que el crecimiento del IRI es prácticamente proporcional al del escalonamiento para una longitud de losa determinada, y que el IRI disminuye con una forma funcional de doble curvatura a medida que se aumenta la longitud de losa, dado un cierto escalonamiento medio. Analizando la relación entre IRI y escalonamiento total acumulado por kilómetro, que se calcula como el producto entre escalonamiento promedio y cantidad total de juntas por km, puede verse en la Figura 4 que la correlación lineal es elevada. Asumiendo que a cero escalonamiento del perfil teórico corresponde IRI nulo, por regresión lineal se obtuvo la siguiente relación directa entre escalonamiento acumulado e IRI:

$$IRI [m/km] = 0,00204254 EscAcum [mm] \tag{1}$$

$$R^2 = 0,96 \quad ; \quad SE = 0,21 \text{ m/km}$$

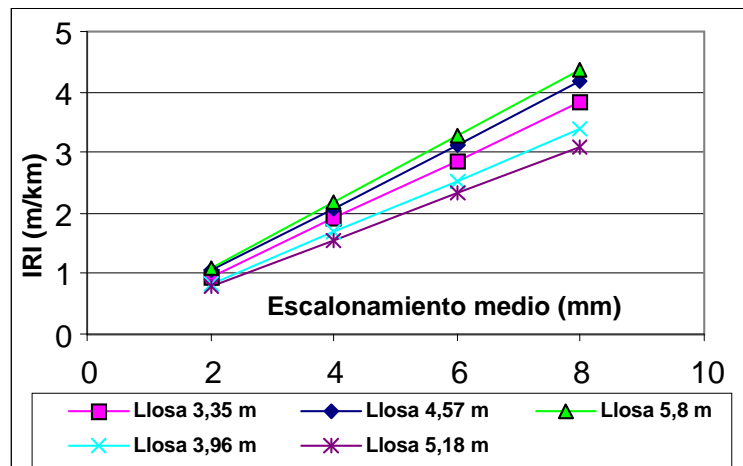


Figura 2. Variación del IRI con respecto al escalonamiento promedio.

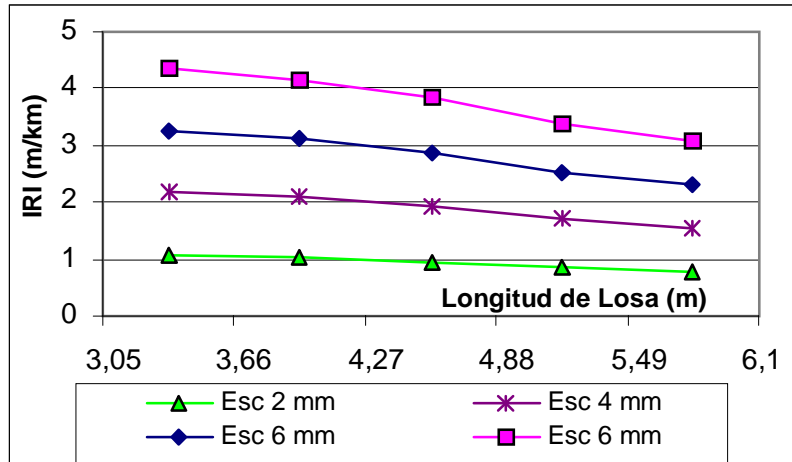


Figura 3. Variación del IRI respecto a la longitud de losa.

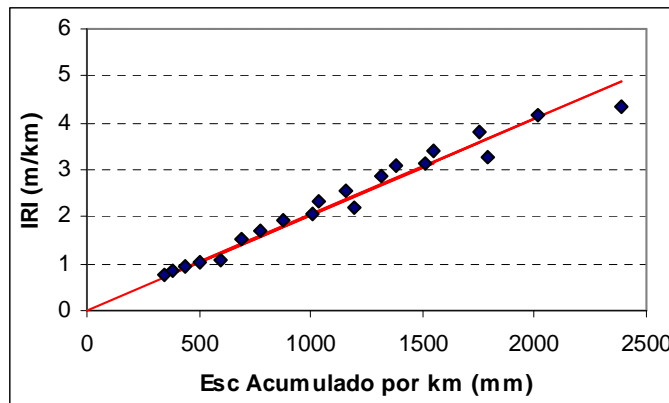


Figura 4. Relación entre escalonamiento acumulado e IRI.

En el caso del deterioro de juntas transversales, el diseño de los perfiles teóricos abarcó las mismas longitudes de losas, y además se distribuyeron las juntas deterioradas en forma homogénea de manera de disponer de un 25%, un 50%, un 75% y un 100% de juntas con deterioro. Es decir que un 25% de juntas deterioradas se tradujo en una junta deteriorada cada cuatro juntas consecutivas, un 50% equivale a una junta deteriorada cada dos y así sucesivamente. Los valores de IRI obtenidos para cada perfil teórico son los que aparecen en Tabla 2. Nuevamente, el IRI guarda una relación muy cercana a la lineal con el total de juntas deterioradas por km, TJD_{et}km, como aparece a continuación:

$$IRI [m/km] = 0,01709 TJD_{et}km [mm] \tag{1}$$

$$R^2 = 0,94 \quad ; \quad SE = 0,12 \text{ m/km}$$

Debe tenerse en cuenta que la relación obtenida entre deterioro de juntas e IRI es muy dependiente de la profundidad del deterioro, por lo tanto el coeficiente es sólo un valor indicativo, pero lo importante es mostrar que es una relación directa (Figura 5).

La relación casi lineal entre IRI y deterioros se ha obtenido asumiendo diversas simplificaciones tales como constancia del escalonamiento, un valor arbitrario de profundidad media del deterioro por desintegración, distribuciones predefinidas de las juntas deterioradas, etc., por lo cual los resultados obtenidos en situaciones reales pueden ser sensiblemente distintos. Asimismo, puede existir una ponderación distinta de la incidencia de los deterioros sobre el IRI cuando coexisten varios deterioros al mismo tiempo, ya que la incidencia del deterioro en las juntas no es la misma cuando también hay escalonamiento en dichas juntas, o viceversa.

Tabla 2. valores de IRI [m/km] obtenidos, perfiles teóricos con juntas deterioradas.

% Juntas Deterioradas	Longitudes de Losa (m)				
	3,35	3,96	4,57	5,18	5,79
25	1.35	1.16	1.01	0.89	0.80
50	2.63	2.23	1.95	1.72	1.55
75	3.67	3.31	2.89	2.53	2.27
100	4.69	4.35	3.83	3.34	3.01

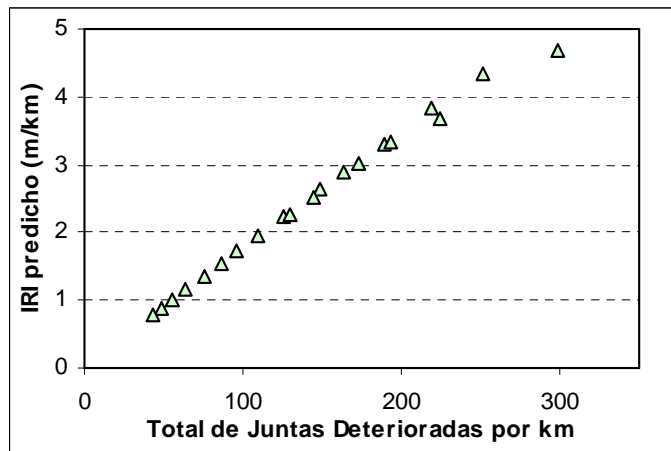


Figura 5. Relación entre IRI y total de juntas deterioradas por km.

El desarrollo de un análisis de simulación que genere un gran número de perfiles teóricos con múltiples combinaciones de niveles de deterioro y longitudes de losas también implicaría asumir una elevada cantidad de hipótesis simplificadoras sobre magnitud y distribución de los deterioros en cada perfil teórico. Además, deberían asimismo considerarse al menos dos efectos adicionales:

- Al inicio de la vida útil, el perfil del pavimento no corresponde a $IRI = 0$ en la realidad, sino que está afectado por deficiencias o imperfecciones constructivas, lo que haría necesario definir para el análisis una serie de perfiles base correspondientes a diferentes valores de IRI de construcción, todos positivos.
- Un aspecto adicional que debería considerarse en un modelo teórico es el alabeo de las losas (por causas térmicas, hidráulicas y alabeo remanente de construcción), ya que el IRI puede aumentar notoriamente en condiciones de alabeo cóncavo de las losas, lo cual se produce cuando la superficie de la losa está más fría que el fondo. La Figura 6 muestra el caso de un pavimento de hormigón en Chile donde ocurre el fenómeno descrito (Ceza et al, 1991). Un modelo de IRI que incorpore este efecto debería considerar que la variación del gradiente térmico de las losas es continua a lo largo de un día entero. Sería necesario en definitiva desarrollar una simulación geométrica de perfiles longitudinales con losas curvadas, que permitan estimar diferentes valores de IRI para distintas longitudes de losa y valores de gradiente térmico

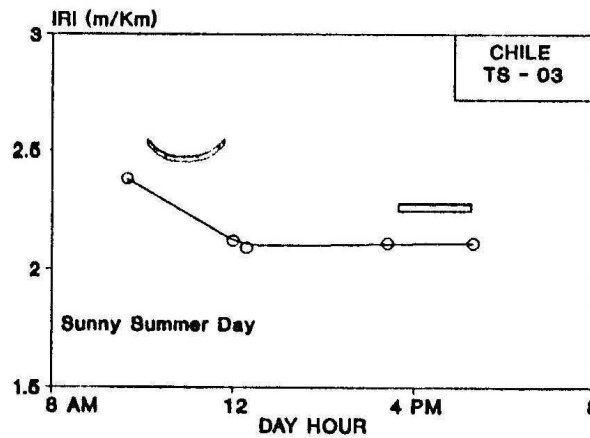


Figura 6. Aumento del IRI con alabeo cóncavo en las losas (Ceza et al, 1991)

La simulación de los efectos individuales sobre el IRI de los distintos factores analizados (deterioros, calidad de construcción y alabeo por causas térmicas), considerando diversas situaciones, puede ser relativamente factible de desarrollar a partir de perfiles teóricos, tal como se ha hecho para el escalonamiento y deterioro de juntas transversales. El problema es que en la realidad se presenta la combinación simultánea de todos estos factores en distintos grados, lo cual es muy complicado de simular a través de perfiles teóricos. Además, es necesario verificar un modelo de este tipo con información de terreno, y en las bases de datos disponibles para el presente estudio no se dispuso de información que permitiera conocer o al menos estimar con un mínimo de confiabilidad tanto el IRI remanente de construcción como las condiciones de alabeo de las losas al momento de efectuar las mediciones del IRI.

En consecuencia, se decidió utilizar directamente la información de terreno disponible y elaborar modelos de tipo empírico en base a la misma, aunque se consideró la experiencia aportada por las simulaciones teóricas desarrolladas como un medio adicional para validar los modelos empíricamente obtenidos.

3. MODELOS INCREMENTALES DE IRI OBTENIDOS UTILIZANDO REGRESIÓN ESTADÍSTICA

Las bases de datos disponibles (SHRP-LTPP y RIPPER '95) cuentan con información de IRI para las distintas secciones de pavimentos. Sin embargo, en la base de datos SHRP-LTPP existen muy pocos datos de incrementos de IRI para los cuales se hayan registrado en el mismo período los correspondientes incrementos de deterioro, de manera de poder correlacionar en forma consistente ambos tipos de incrementos. La gran mayoría de los datos incrementales utilizados en este estudio se han obtenido a partir de la base de datos RIPPER '95, donde se realizaron dos campañas de medición de deterioros e IRI (Yu et al, 1997).

Del análisis preliminar que se realizó sobre los datos incrementales de IRI provistos por LTPP, pudo apreciarse que en varias de las escasas secciones donde se registró información sobre incrementos de deterioro e IRI, los datos de escalonamiento tenían muy poca confiabilidad. Para dichas secciones, que registraron elevados incrementos de escalonamiento en plazos muy breves, no se correspondió un aumento significativo del IRI medido (Bustos, 1999). Dado que el escalonamiento es un deterioro que tiene influencia directa sobre el IRI, como ha sido comprobado en diversos estudios (Yu et al, 1997; Ceza et al, 1991) y se verifica más adelante, la inconsistencia de la información registrada motivó su descarte para el análisis, y se decidió en este caso trabajar únicamente con la información provista por la base de datos RIPPER '95.

Dicha información se analizó mediante técnicas estadísticas convencionales, considerando incrementos anuales tanto para los deterioros como para el IRI. En primera instancia, se desarrolló un modelo preliminar que dependía exclusivamente de los incrementos de deterioro observados, considerando el incremento de IRI como una función lineal de los incrementos de deterioros propios de las juntas transversales, tal como lo indica el análisis realizado en base a perfiles teóricos, más un término adicional que incorporaba la influencia del agrietamiento existente, es decir, la incidencia del deterioro y escalonamiento de las grietas existentes sobre el IRI. El modelo desarrollado fue el siguiente:

$$\Delta IRI = 2,7E-3 \Delta EscAcum + 3,78E-3 \Delta DetJT + 0,0241 \Delta PLAGri + 1,54E-3 PLAGri \quad (2)$$

$$R^2 = 0,15 \ ; \ SE = 0,10 \text{ m/km} \ ; \ N = 53$$

Siendo:

ΔIRI	:	Incremento anual de IRI, m/km
$\Delta EscAcum$:	Incremento anual del escalonamiento acumulado, mm
$\Delta DetJT$:	Incremento anual del porcentaje de juntas deterioradas, %
$\Delta PLAgri$:	Incremento anual del porcentaje de losas agrietadas, %
$PLAgri$:	% de losas agrietadas existentes, al inicio del año de evaluación

El gráfico de valores predichos vs observados se muestra en la Figura 7. Si bien todos los coeficientes de la Ec. 2 son estadísticamente significativos al 90% de confianza, puede verse que existe una importante cantidad de datos de incrementos positivos de IRI que son claramente subpredichos por el modelo. El uso de una constante que funcione como ordenada al origen puede mejorar el ajuste global del modelo, pero es una constante de regresión que se adiciona a todos los incrementos de IRI en forma anual, independientemente de las condiciones del pavimento, tránsito y clima, lo cual no es razonable.

No se incorporaron otros deterioros en la ecuación de predicción de incrementos de IRI por las siguientes razones:

- El escalonamiento y deterioro de juntas transversales, y la aparición de grietas transversales y su posterior deterioro son los problemas que más incidencia tienen sobre la serviciabilidad o sobre el IRI en pavimentos de hormigón, de acuerdo a diversas investigaciones desarrolladas sobre el tema (Smith et al, 1990; Salsilli, 1991; Yu et al, 1997).
- No obstante, en las bases de datos disponibles no se pudo contar con información suficiente sobre incrementos de otros tipos de deterioro posiblemente influyentes sobre el IRI, como son las grietas de esquina, que permitieran evaluar mediante regresión estadística la influencia empírica de dichos deterioros sobre el IRI.

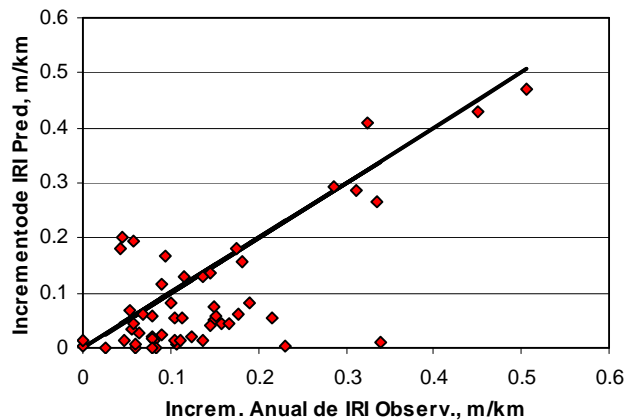


Figura 7. Incrementos de IRI Predichos vs Observados, Ecuación 2

Con el propósito de mejorar el modelo, se evaluó la incorporación de un término que incluyera la influencia de la edad del pavimento, de manera de representar el efecto de otros deterioros que se van generando con el tiempo, y de otras variables no consideradas en los modelos de deterioro. No se utilizó el parámetro de tránsito acumulado, muy correlacionado con la edad, porque justamente uno de los principales objetivos del modelo incremental es evitar la necesidad de estimar este parámetro; por otra parte, el tránsito (ya sea anual o acumulado) incide en forma directa sobre el escalonamiento y el agrietamiento, por lo cual se estaría incorporando sesgo en la ecuación si se incluye el tránsito, aunque esto pudiese mejorar en parte el ajuste global del modelo.

El modelo alternativo desarrollado, presentado en la Ec. 3, incorpora además en forma conjunta la incidencia del incremento de las grietas transversales y las grietas existentes a través de una variable mixta representativa de su interacción. Todos los coeficientes estimados son estadísticamente significativos con un 90% de confianza también en este caso.

$$\Delta IRI = 2,45E-3 \Delta EscAcum + 2,82E-3 \Delta DetJT + 6,03E-4 \Delta PLAGri PLAGri + 5,38E-3 Edini \quad (3)$$

$$R^2 = 0,40 \quad ; \quad SE = 0,08 \text{ m/km} \quad ; \quad N = 53$$

y donde:

ΔIRI	:	Incremento anual de IRI, m/km
$\Delta EscAcum$:	Incremento anual del escalonamiento acumulado, mm
$\Delta DetJT$:	Incremento anual del porcentaje de juntas deterioradas, %
$\Delta PLAGri$:	Incremento anual del porcentaje de losas agrietadas, %
$PLAgri$:	% de losas agrietadas existentes al inicio del año de evaluación
$Edini$:	Edad al inicio del año de evaluación.

El correspondiente gráfico de incrementos de IRI predichos y observados aparece en la Figura 8. Puede verse como se logra una mejor distribución de los datos alrededor de la línea de equivalencia y un mejor ajuste respecto al modelo anterior. Asimismo, se reduce la influencia relativa de los deterioros sobre el incremento del IRI, con el coeficiente del escalonamiento acumulado acercándose más al coeficiente de influencia teórica que aparece en la Ec. 1.

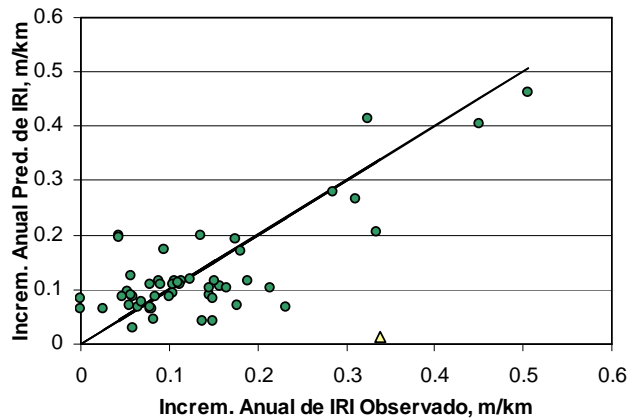


Figura 8. Incrementos de IRI Predichos vs Observados, Ecuación 3.

Puede asimismo mejorarse sensiblemente el ajuste del modelo descartando el dato “outlier” que aparece en la parte inferior del gráfico mostrado en la Figura 8, llevando el ajuste del modelo a un valor de $R^2 = 0,57$, pero no se modifican sustancialmente los coeficientes de influencia de los parámetros, por lo cual es indiferente su eliminación. Además, no se detectaron en este caso razones de peso para eliminar el dato.

4. CONCLUSIONES

El modelo incremental desarrollado que aparece en la Ecuación 3 presenta los siguientes aspectos destacables:

- Por haber sido directamente desarrollado a partir de datos de incrementos de deterioro, no requiere el conocimiento previo del valor del IRI remanente de construcción, el cual es un dato muy importante y raramente disponible. Se puede utilizar directamente en la predicción de futuros incrementos de IRI a partir del valor de IRI registrado en el pavimento al momento de comenzar la evaluación.
- A través del término que incluye la edad del pavimento, incorpora en forma global el efecto de otros deterioros y factores que inciden sobre el IRI además del escalonamiento y deterioro de juntas transversales, y del agrietamiento transversal.
- La incidencia del deterioro más influyente sobre el IRI, que es el escalonamiento, es sumamente cercana a la que puede ser obtenida a partir de simulaciones teóricas (comparar Ec. 1 con Ec. 3).
- Se incorpora el efecto adicional de incremento de IRI por deterioro de grietas ya existentes.

- La predicción de incrementos en forma anual facilita su utilización dentro de un sistema de gestión de pavimentos donde se desarrolle planificación anualizada de los programas de mantenimiento, conservación y rehabilitación.
- No obstante, también presenta las siguientes limitaciones:
 - La información sobre incrementos de deterioro es limitada, ya que corresponde sólo a dos campañas de medición consecutivas en la base de datos RIPPER '95; hubiera sido deseable disponer de series más extensas de mediciones de deterioro e IRI.
 - Debido a la falta de información adicional sobre datos incrementales de IRI, no pudo verificarse adecuadamente su capacidad predictiva utilizando otras bases de datos.
 - La significatividad estadística de la incidencia de la edad es muy fuerte, siendo la variable más incidente después del escalonamiento acumulado. Pero es muy posible que la incidencia de la edad incorporada en el modelo sea excesivamente elevada para pavimentos con varios años de servicio, ya que de acuerdo al modelo, a edades elevadas el incremento de IRI es debido casi exclusivamente al paso del tiempo.

Respecto a este último punto, cabe nuevamente destacar que en pavimentos de hormigón los efectos específicamente debidos al paso del tiempo no son tan importantes como en los pavimentos de asfalto, ya que el hormigón no es tan susceptible a la oxidación y envejecimiento como las mezclas asfálticas. Por ello, es importante en futuras investigaciones avanzar en el análisis de las causas que contribuyen a aumentar el IRI además de los deterioros específicamente incorporados, a fin de incluir dichos efectos en forma directa y no disimulada detrás del efecto global del tiempo de vida del pavimento.

Se recomienda, asimismo, procurar una mayor validación del modelo desarrollado utilizando datos de incrementos de IRI provistos por nuevas fuentes de información, dado que ha sido desarrollado con una cantidad relativamente baja de datos de incrementos de IRI. El empleo de la base de datos SHRP-LTPP, en la medida que se disponga de nuevos datos, puede resultar muy útil para validar los modelos incrementales de predicción de IRI.

5. 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 para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- CEZA, P., ESPINOZA, R., GARCÍA, A., POBLETE, M. (1991), "Equivalence Between IRI and Surface Quality of PCC Pavements". XIXth. World Road Congress, PIARC. Marrakech.
- ODOKI, J.B., AND 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. University of Birmingham, UK.
- SALSILLI, R. A. (1991), "Calibrated Mechanistic Design Procedure for Jointed Plain Concrete Pavements". PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- SAYERS, M., GILLESPIE, T., QUEIROZ, C. (1986), "The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and Calibration Standard for Measurements". World Bank Report N° 45, Washington D.C., USA.
- SAYERS, M., KARAMIHAS, S. (1997), "The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles". University of Michigan, USA.
- SHRP (1993), "Sensitivity Analyses for Selected Pavement Distresses", SHRP-P-393, Strategic Highway Research Program, National Research Program, Washington, D.C., USA.
- SHRP (1993), "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project", Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report SHRP-P-338, Washington D.C, USA.
- SMITH, K.D., PESHKIN, D.G., DARTER, M.I., MUELLER, A.L. Y CARPENTER (1990), "Performance of Jointed Concrete Pavements, Vol. III Summary of Research Findings". Report N° FHWA-RD-89-138. ERES Consultants Inc., Illinois, USA.
- 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.

Marcelo Bustos
Anibal Altamira
Profesores Adjunto
Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña
Universidad Nacional de San Juan
Argentina

Hernán de Solminihac
Profesor Titular
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

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

Juan Pablo Covarrubias
Gerente General
Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón
Santiago, Chile

Marcelo Bustos
Anibal Altamira
Professors School of Engineering of Mountain Roads
Universidad Nacional de San Juan
Argentina
mbustos@eicam.unsj.edu.ar
altamira@eicam.unsj.edu.ar

Hernán de Solminihac
Professor, Department of Construction Engineering and Managment
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
hsolmini@ing.pu.cl

Michael Darter
Senior Principle Engineer
ERES Cons. Division of ARA, Inc..
Champaign, Illinois, U.S.A.
MDarter@eresnet.com

Juan Pablo Covarrubias
General Manager
Chilean Concrete Institute
Santiago, Chile
jpcovarrubias@ich.cl