



SEMINARIO INTERNACIONAL DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN
24 y 25 DE OCTUBRE 2012 • CIUDAD DE CÓRDOBA - ARGENTINA



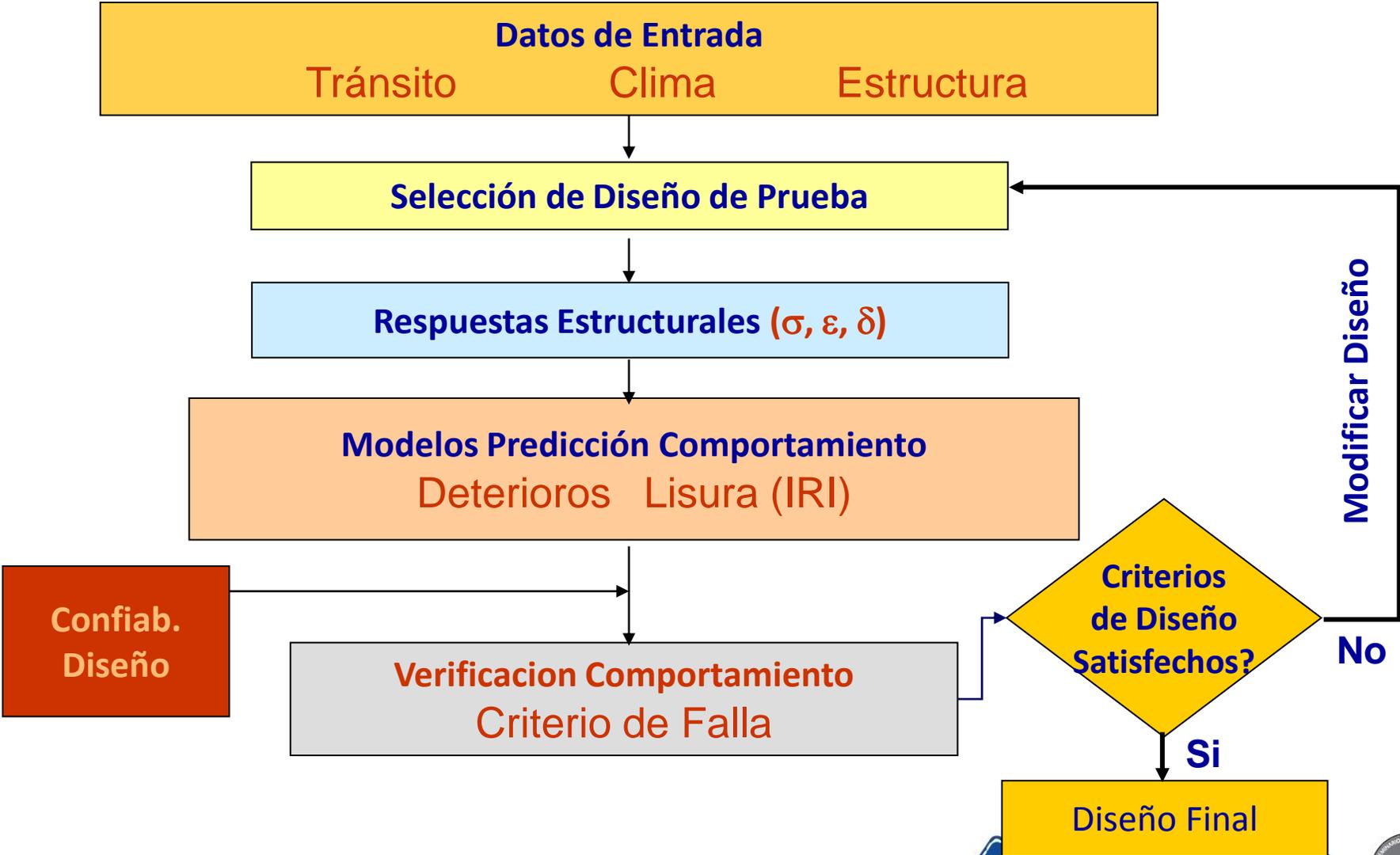
“Experiencias en Argentina para la calibración local de la metodología de diseño empírico-mecanicista MEPDG, aplicada a pavimentos de hormigón”

Expositor: Dr. Ing. Marcelo Bustos
Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña,
Universidad Nacional de San Juan

Diseño Empírico – Mecanicista (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG)

- Combina aspectos tanto empíricos como mecanicistas
- Los componentes mecanicistas permiten determinar la respuesta del pavimento ante situaciones “críticas” de cargas y clima, utilizando modelos matemáticos
- Los componentes empíricos relacionan respuesta del pavimento con indicadores observados de comportamiento (deterioros e IRI)
- Se definen límites aceptables y confiabilidad en forma individual para cada indicador

Procedimiento de diseño MEPDG



Objetivos del Proyecto

- Analizar y evaluar los mecanismos de diseño estructural y los modelos de predicción del comportamiento de pavimentos incorporados en el método MEPDG
- Elaborar una base de datos sobre pavimentos de hormigón en Argentina con información recopilada en instituciones oficiales y en terreno
- Ajustar a las condiciones locales la caracterización de climas, tránsito y materiales, y los modelos de predicción del comportamiento

Metodología de Investigación

- Estudio detallado de los modelos de deterioro contenidos en el método MEPDG para el caso de los pavimentos rígidos
- Selección de rutas representativas con pavimentos rígidos a lo largo del territorio argentino, para abarcar un amplio rango de cargas de tránsito, edades y climas
- Adaptación de procedimientos de recolección de datos de deterioro a partir de estudios anteriores

Metodología... (cont.)

- Recopilación de información en instituciones viales (D.N.V. y Vialidades Provinciales) y el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA), como así también datos climáticos en el Servicio Meteorológico Nacional
- Procesamiento e incorporación de datos para configurar archivos dentro del programa MEPDG
- Predicción del deterioro utilizando modelos matemáticos con coeficientes provistos por “default” en dicho programa

Metodología... (cont.)

- Comparación entre valores de deterioro predichos y observados, y determinación de valores ajustados para los coeficientes de los modelos de deterioro (escalonamiento, fisuras e IRI)
- Análisis de resultados obtenidos, tendencias observadas y limitaciones para la aplicabilidad de la calibración a diferentes condiciones

Información Utilizada

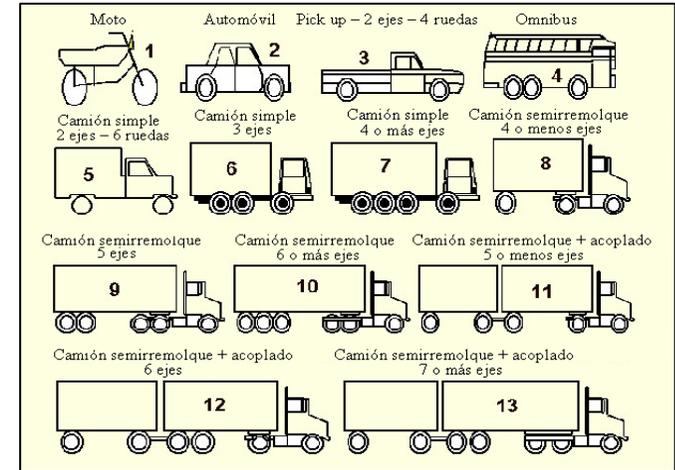
- Pavimentos de hormigón situados en la región centro-norte de Argentina, abarcando una amplia gama de climas, desde frío nival en los Andes hasta subtropical y templado en las llanuras del Litoral argentino
- Sólo se evaluaron secciones de pavimentos de hormigón simple con juntas
- Datos de deterioro fueron recolectados en campañas a terreno mediante inspección visual o bien fueron provistos por la D.N.V. (caso IRI)

Rutas inspeccionadas en el estudio



Datos de Tránsito

- Provistos por la D.N.V. a partir de censos anuales y en algunos casos solicitados de manera específica (distribución mensual y horaria).
- Tipificados según clasificación FHWA



Vehíc.	FHWA	D.N.V. Argentina
1	Motocicletas	Motocicletas
2	Automóviles	Automóviles
3	Dos ejes, cuatro ruedas	Camionetas
4	Omnibus	Omnibus
5	Camión simple, dos ejes, seis ruedas	Camión 1-1
6	Camión simple, tres ejes	Camión 1-2
7	Camión simple, cuatro o más ejes	1-3
8	Semirremolque, cuatro o menos ejes	1-1-1, 1-1-2, 1-2-1
9	Semirremolque, cinco ejes	1-2-2, 1-1-3
10	Semirremolque, seis o más ejes	1-2-3, 1-3-3
11	Camión o semi c/acoplado, 5 o menos ejes	1-1-1-1-1, 1-1-1-2, 1-2-1-1, 1-1-1-1
12	Camión o semi con acoplado, seis ejes	1-1-2-1-1, 1-2-1-2, 1-1-1-3
13	Camión o semi con acoplado, 7 o más ejes	1-2-2-1-1, 1-1-2-1-2, 1-2-2-1-2

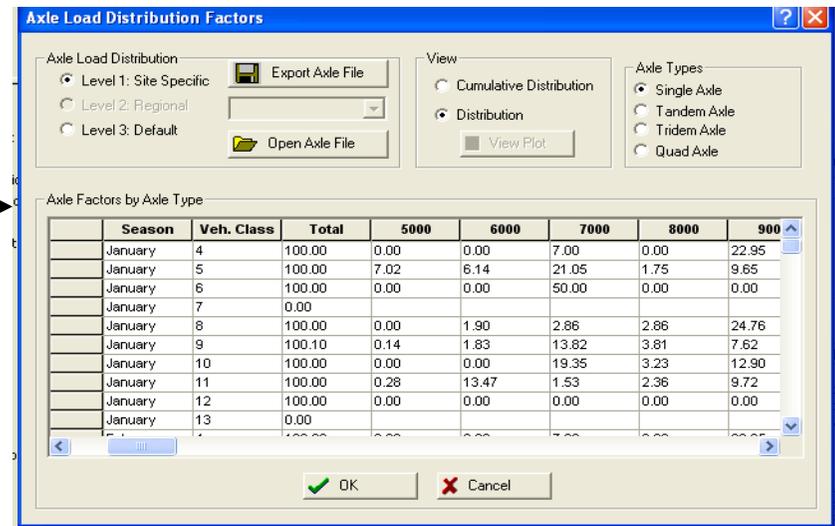
Factores de distribución por eje

Tipo de camión	Ejes simples	Ejes tándem	Ejes trídem
4	1,56	0,44	0,00
5	2,00	0,00	0,00
6	1,00	1,00	0,00
7	1,00	0,00	1,00
8	2,28	0,72	0,00
9	1,51	0,98	0,51
10	1,00	1,00	1,00
11	3,01	0,97	0,00
12	2,33	1,33	0,33
13	2,15	2,13	0,35

Espectros de carga

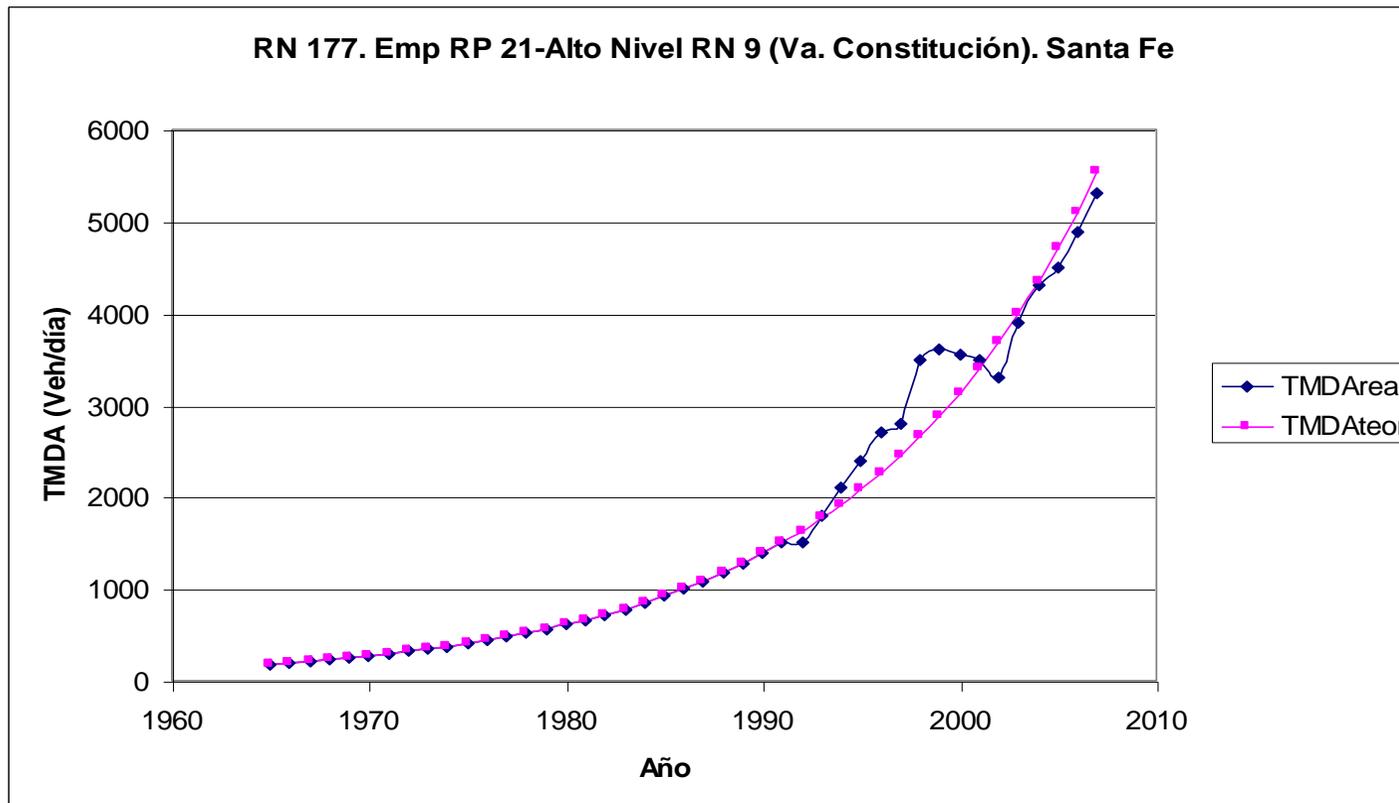
(adoptados de estudio EICAM 1994)

Se generan con el DG2k2 archivos *.alf



Tasas crecimiento tránsito

- Estimadas a partir de censos históricos en cada una de las secciones



Datos y archivos climáticos

- ✓ Fueron solicitados al Servicio Meteorológico Nacional:
 - Temperaturas horarias durante un período de 4 años consecutivos.
 - Precipitación diaria.
 - Cobertura nubosa horaria.
 - Velocidad del viento horaria.
 - Humedad relativa ambiente media mensual.
 - Radiación solar:
 - Función de la latitud del lugar y época del año. Fueron determinados con el software DG2k2 de la Guía MEPDG con igual longitud y latitud Norte → desfasaje de 6 meses para hacerla compatible con lugares del hemisferio Sur.
 - Salida y puesta del sol: Con igual longitud y latitud Norte. Desfasaje de 6 meses para hemisferio Sur.
 - Nivel freático: Influencia muy leve cuando supera los 3 m. En algunas zonas del litoral mesopotámico se tomó 1 m.

Generación de archivos climáticos

- En base a los datos provistos por el SMN

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Estación	dd	mm	aaaa	HOA	T(°C)	dd(°/10)	ff(km/h)	nubosidad (octavos)	
	1									
	2			2003	0	22,8	0	0	0	
	3	1	1	2003	1	19,9	18	4	8	
	4	1	1	2003	2	19,8	16	6	8	
	5	1	1	2003	3	19,6	18	6	8	
	6	1	1	2003	4	19,1	18	6	5	
	7	1	1	2003	5	18,2	16	6	3	
	8	1	1	2003	6	17,5	16	7	5	
	9	1	1	2003	7	18	14	6	7	
	10	1	1	2003	8	19	16	11	8	
Estación	11	1	1	2003	9	20,5	14	13	8	
	12	1	1	2003	10	20,8	14	13	8	
	13	1	1	2003	11	23,5	14	11	5	
	14	1	1	2003	12	23,7	14	13	5	
	15	1	1	2003	13	24	11	11	5	
	16	1	1	2003	14	25,5	11	9	4	
	17	1	1	2003	15	26,4	11	11	4	
Día	18	1	1	2003	16	26,6	7	15	3	
	19	1	1	2003	17	25,6	9	15	3	
	20	1	1	2003	18	25,3	9	13	3	
Mes	21	1	1	2003	19	26	7	13	1	
	22	1	1	2003	20	25,8	9	7	0	
	23	1	1	2003	21	22,1	14	6	0	
Año	24	1	1	2003	22	21,2	11	4	0	
	25	1	1	2003	23	20,5	9	0	0	
Hora	26	2	1	2003	0	20	16	6	0	
	27	2	1	2003	1	20,9	9	9	0	
	28	2	1	2003	2	20,6	9	6	0	
	29	2	1	2003	3	19,6	9	6	0	
	30	2	1	2003	4	19,2	11	7	0	
	31	2	1	2003	5	17,9	11	6	0	
	32	2	1	2003	6	17,6	0	0	0	
	33	2	1	2003	7	18,7	16	4	1	
	34	2	1	2003	8	19,5	9	17	1	

Temperatura °C

Dirección del viento grados

Velocidad del viento Km/hora

Cobertura nubosa octavos de cielo

SMN → archivos Excel → reordenamiento → pasaje a unidades inglesas → creación con Word Pad o Editor (DOS) archivo *.icm (Compatible con DG2k2)



Caracterización de los materiales

- Información obtenida de diversas fuentes
 - Testigos y probetas de hormigón (DNV - ICPA)
 - Deflectometría con FWD (EICAM)
 - Ensayos de CBR en materiales de capas no ligadas
 - Estimaciones de propiedades de suelos locales

- Tipos de datos:
 - Requeridos para determinar respuesta estructural
 - Requeridos adicionalmente por modelos de deterioro
 - Requeridos por los modelos climáticos

Hormigón:

$$MR = 9,5 (f'_c)^{0,5}$$

$$E_c = 33 \rho^{3/2} (f'_c)^{1/2}$$

Coef. Expansión Térmica

Ruta	Tramo	Árido grueso	α_{pcc}	
			$\times 10^{-6} \text{°C}$	$\times 10^{-6} \text{°F}$
RNA019	Fábrica Fiat-Km 20 (Córdoba)	Granito	9,5	5,3
RN158	Quebracho Herrado-Colonia Prosperidad (Córdoba)	Granito	9,5	5,3
RN7	Punta de Vacas-Entrada Túnel Internacional	Riolita	9,9	5,5
RN127	Federal-Cuatro Bocas	Basalto	8,6	4,8
RN177	Emp. RP21-Alto Nivel RN9 (Santa Fe)	Granito	9,5	5,3
RP39	San Javier-A° Saladillo Amargo (Santa Fe)	Granito	9,5	5,3
RN7	Límite con Córdoba-Límite con Mendoza	Granito	9,5	5,3
RN157	Frías-Lavalle (Santiago del Estero)	Caliza	6,8	3,8
RN157	Bella Vista-Autopista de Circunvalación (Tucumán)	Caliza	6,8	3,8

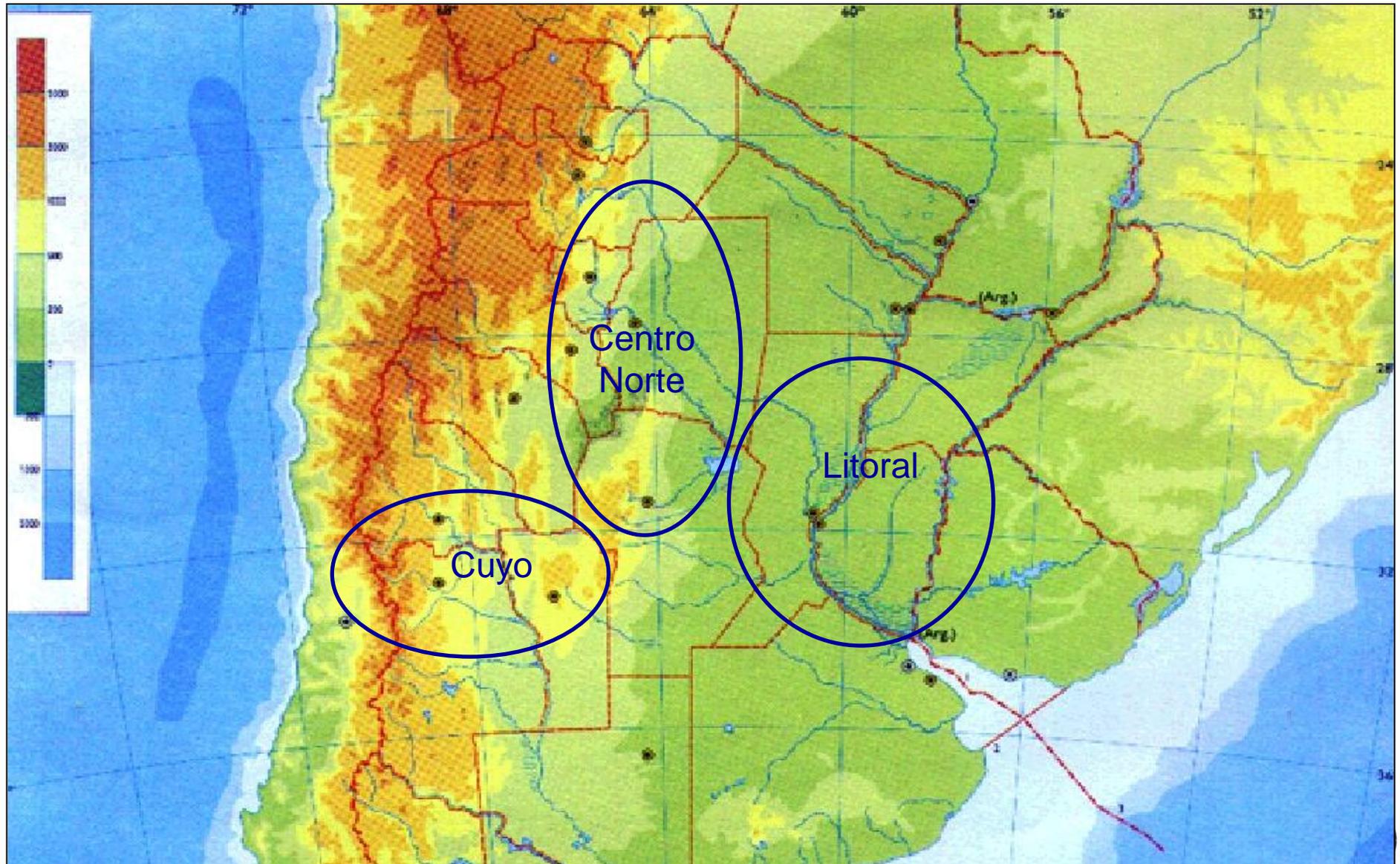
Bases granulares $M_R = 2555 (CBR)^{0,64}$

Bases granulares tratadas $E = 57000 \sqrt{f'_c}$

Bases de suelo-cemento $M_R = 0,124 q_u + 9,98$



Regiones abarcadas por el estudio



Pavimentos en la región de Cuyo



Pavimentos Analizados: Prov. Mendoza

- Ruta Nac. N° 7: tramo “Punta de Vacas – Lím. Internac. c/ Chile”
- Situado en sector limítrofe, en plena Cordillera de los Andes
- Fisuración extensa en algunos sectores, deterioro de juntas y superficie hacia el límite



Pavimentos Analizados: Prov. San Luis

- 2da calzada, Autopista en R.N. Nº 7
 - Abarca desde límite con Córdoba a límite con Mendoza (210 km)
 - Sectores en excelente estado alternados con sectores que presentan losas con elevado nivel de deterioro
 - Fallas en sectores con deterioro: posible causa en problemas con los suelos y el bombeo



Pavimentos en región Litoral



Pavimentos Analizados: Prov. Santa Fe

- Ruta Nac. N° 177: Villa Constitución
 - Tránsito a fábrica metalúrgica (Acindar)
 - Muy viejo y deteriorado
 - Alta proporción de fisuras longitudinales (losas cortas, de 3 m entre juntas transversales)



Pavimentos Analizados: Prov. Santa Fe

- Ruta Prov. Nº 39: San Javier
 - Arroyo Saladillo Amargo
 - Zona netamente rural
 - Muy llana y de clima templado húmedo
 - Pavimento de unos 10 años de edad
 - Muy buen estado en general
 - El tránsito es reducido y de tipo estacional



Pavimentos Analizados: Zona Litoral

- Ruta Nac. N° 127, “Federal – Cuatro Bocas” (Entre Ríos y Corrientes)
 - Pavimento con 10 años de edad (1997-98)
 - Sectores en buen estado y otros muy deteriorados
 - Probables problemas constructivos en la capa de base
 - Incluso problemas superficiales en tramo final



Zona Litoral: R.N. Nº 127

En sectores más deteriorados también se presenta escalonamiento en grietas y en juntas transversales, asociado a bombeo de material líquido y finos en suspensión



Pavimentos en región centro - norte



Pavimentos Analizados: Prov. Córdoba

- Autop. A018 - Avda. Circunv. Córdoba
 - Algunos sectores con alto deterioro superficial por fisuras de tipo plástico

- Ruta Nac. N° 158, tramo “Quebracho Herrado – Colonia Prosperidad”
 - Importante tránsito de vehículos pesados
 - Zona llana y húmeda
 - Deterioro y agrietamiento, presencia de agua



Pavimentos en Zona Centro - Norte

- Ruta Nacional Nº 157:
tramo “Frías – Lavalle”,
prov. de Santiago del
Estero
 - Zona llana pero más seca
 - Pavimento de edad
intermedia que ha
mostrado bastante buen
comportamiento en
general
 - Juntas bien mantenidas
 - Mejores suelos



Pavimentos en Zona Centro - Norte

- Ruta Nacional N° 157: tramo “Tucumán - Bellavista”, prov. de Tucumán
 - Zona muy húmeda
 - Tránsito pesado de tipo agrícola
 - Pavimento muy antiguo, muy deteriorado y con sectores reemplazados
 - No tiene subbase



Análisis de Modelos de Comportamiento: Escalonamiento de Juntas Transversales

$$\Delta\text{Fault}_i = C_{34} \left(\text{FAULTMAX}_{i-1} - \text{Fault}_{i-1} \right)^2 DE_i$$

$$\text{FAULTMAX}_i = \text{FAULTMAX}_0 + C_7 \sum_{j=1}^m DE_j \log \left(1 + C_5 5,0^{\text{EROD}} \right)^{C_6}$$

$$\text{FAULTMAX}_0 = C_{12} \delta_{\text{curling}} \left[\log \left(1 + C_5 5,0^{\text{EROD}} \right) \log \left(\frac{P_{200} \text{WetDays}}{P_s} \right) \right]^{C_6}$$

$$C_{12} = C_1 + (C_2 \text{FR}^{0,25})$$

$$C_{34} = C_3 + (C_4 \text{FR}^{0,25})$$

$$C_1 = 1,29$$

$$C_2 = 1,1$$

$$C_3 = 0,001725$$

$$C_4 = 0,0008$$

$$C_5 = 250$$

$$C_6 = 0,40$$

$$C_7 = 1,20$$

Valores por defecto

C_6 : Factor de Ajuste



Coeficientes Ajuste Modelo Escalonamiento

Distress Model Calibration Settings - Rigid (new)

Punchouts | **Faulting** | Cracking | IRI-jpcp | IRI-crccp

$$C_{12} = C_1 + (C_2 * FR^{0.25})$$
$$C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$$
$$FaultMax0 = C_{12} * \delta_{curving} * [\text{Log}(1 + C_5 * 5^{EROD}) * \text{Log}(P_{200} * WetDays / p_1)]^{C_6}$$
$$FaultMax = FaultMax0 + C_7 * DE_{spall} * \text{Log}(1 + C_5 * 5^{EROD})$$
$$\Delta Fault = C_{34} * (FaultMax - Fault)^2 * DE_m$$
$$C_8 = DowelDeterioration$$

Faulting Coefficients

C1	1.0184	C5	250
C2	0.91656	C6	0.4
C3	0.0021848	C7	1.83312
C4	0.0008837	C8	400

Reliability (FAULT)

Std. Dev. POWER(0.0097*FAULT,0.5178)+0.014

OK Cancel

Calibración individual por tramos

Ruta	Sección	Espesor losa (cm)	Long. de losa (m)	Subrasante	Precipitación anual (mm)	Índice de Thornthwaite	Calibración del modelo de escalonamiento			Calibración del modelo de fisuración			Descascaramiento observado en juntas (%)	Factor de Lugar SF	IRI observado (m/km)
							EROD	Escalonamiento observado (mm)	Coefficiente C6	ΔT° efectivo remanente	% observado de losas fisuradas	Coefficiente C1			
A019	Fábrica Fiat-Km 20	21	4.5	A-4	870	13.3	1	1.95	0.27	-15	5.0	2.28	35.0	0.00	4.25
RN158	Q. Herrado -C.Prospерidad	20	5	A-6	998	23.5	4	1.87	0.33	-15	11.2	2.08	28.0	0.00	4.63
RN7	Punta de Vacas - Cerro Ardito+1 Km	20	4	A-1-b	280	-11.0	4	1.79	0.11	-20	13.2	2.22	23.6	0.06	4.25
	Co. Ardito+1 Km -Penitentes+1 Km	20	4	A-1-b	320	-1.5	4	1.51	0.03	-20	15.0	2.04	40.0	0.08	4.14
	Penitentes+1 Km - Arroyo La Salada	20	4	A-1-b	320	-1.5	4	1.89	0.02	-20	32.0	1.92	45.0	0.08	4.20
	A° La Salada - Frontera Argentina/Chile	20	4	A-1-b	366	27.4	4	2.26	0.63	-15	12.5	1.73	93.3	0.21	5.05
RN127	Sección I	23	4.5	A-7-6	1308	54.6	3	1.53	1.41	-10	6.7	1.57	9.0	0.00	3.29
	Sección II	22	4.5	A-7-6	1308	54.6	5	4.02	1.46	-10	8.6	1.57	15.2	0.00	3.33
	Sección III	22	4.5	A-7-6	1308	54.6	3	1.6	1.41	-10	5.0	1.63	11.4	0.00	2.73
	Sección IV	22	4.5	A-7-5	1496	71.4	3	3.05	1.60	-10	11.4	1.65	22.9	0.00	2.56



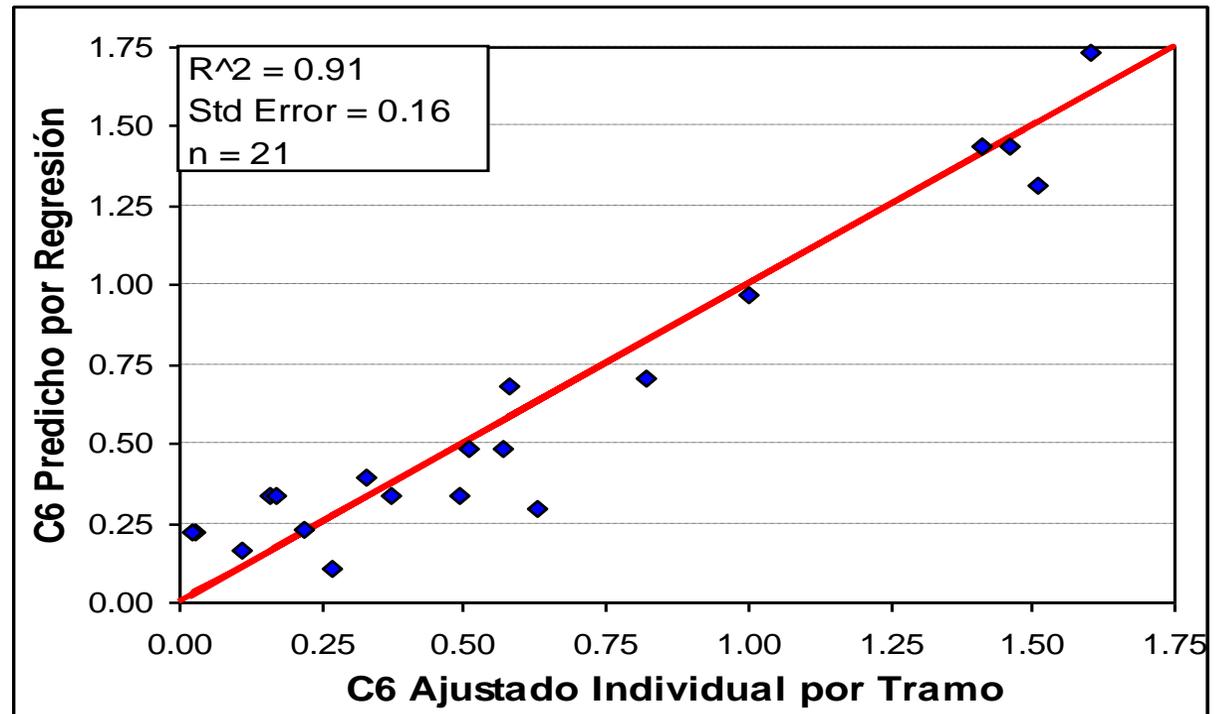
Correlación entre valores de C_6 y variables

Análisis de regresión lineal

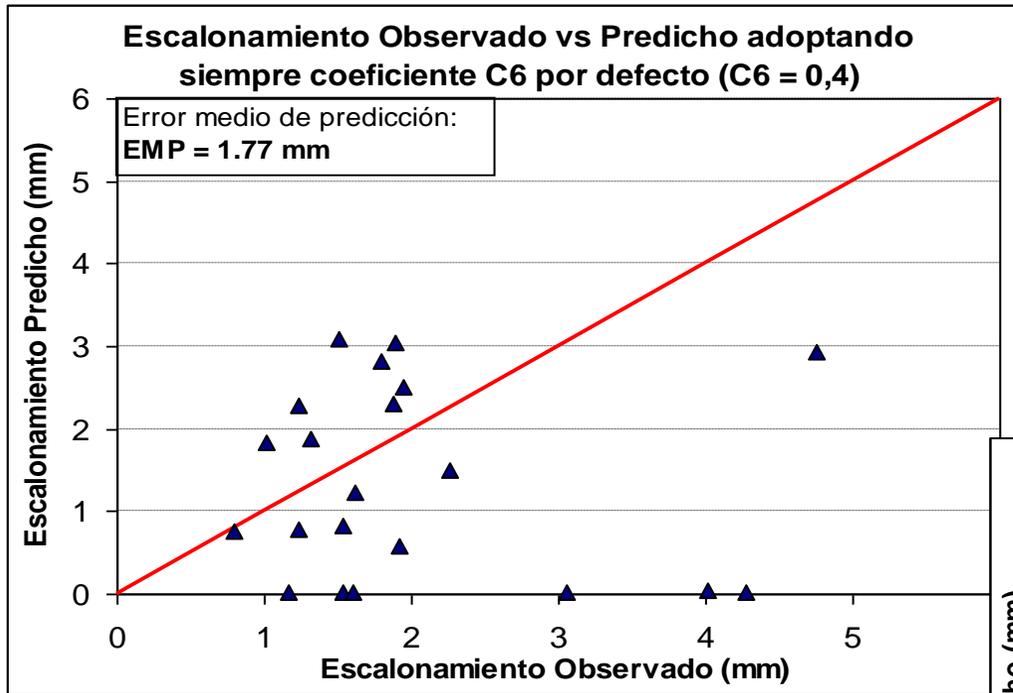
$$C_6 = -1,11326 + 0,00154 \ln(\text{PREC}) - 1,086 \text{ SUBR} + 0,8315 \text{ BASE SUBR} + 0,0189 \text{ LLOSA}^2 + 0,1775 \ln(\text{EDAD})$$

(-5,46) (11,23) (-6,52) (6,22) (2,45) (3,58)

Precipitaciones, tipo de suelo, tipo de base, longitud de losa y edad tienen mayor incidencia sobre el escalonamiento que la que indica el modelo sin calibrar

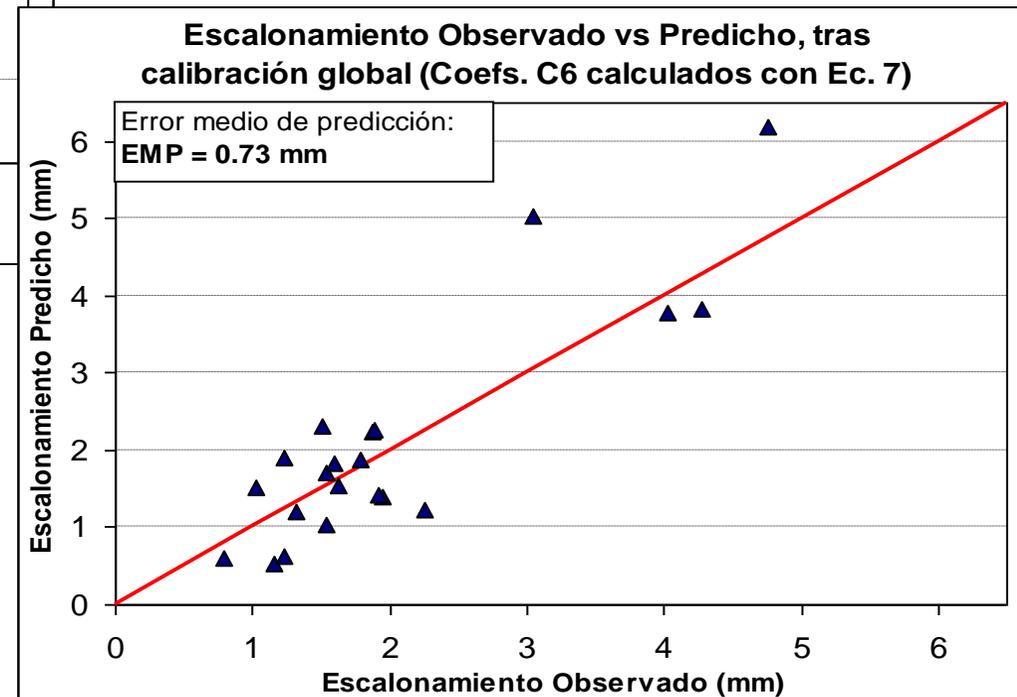


Mejoras en Predicción Escalonamiento



Predicción con modelo
sin calibrar

Predicción con modelo
ya calibrado



Análisis de Modelos de Comportamiento: Agrietamiento Transversal

$$\log N = C_1 \left(\frac{M_r}{\sigma} \right)^{C_2}$$

Por defecto: $C_1 = 2,0$; $C_2 = 1,22$

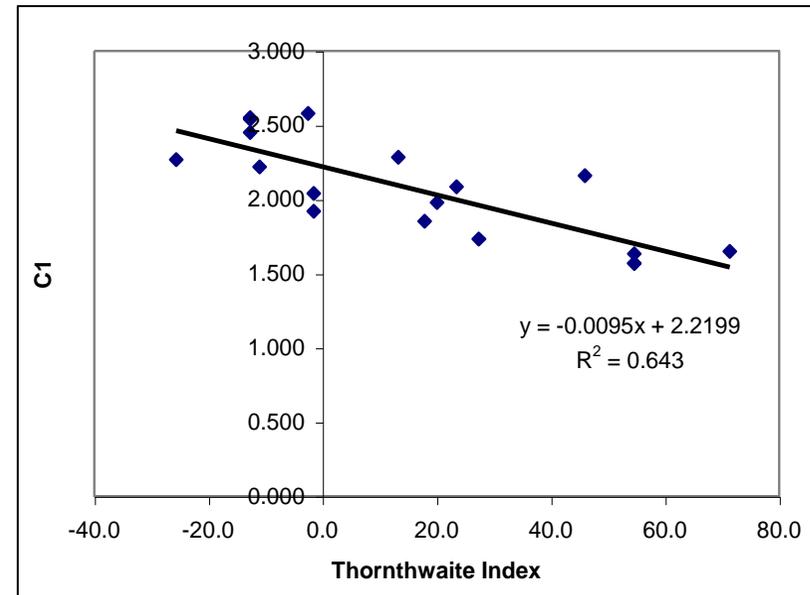
C_1 factor de ajuste, pues aparece como multiplicador

- C_1 muestra cierta correlación con indicadores de humedad
- Pero el problema de fisuración está más relacionado en realidad con suelos y tipos de subbases

$$CRK = \frac{C_3}{1 + C_4 \text{ Daño}^{C_5}}$$

Por defecto:

$C_3 = 100$; $C_4 = 1,0$; $C_5 = -1,68$



Coeficientes Modelo Agrietamiento

Distress Model Calibration Settings - Rigid (new)

Punchouts | Faulting | Cracking | IRI-jpcp | IRI-crccp

Fatigue Coefficients

C1

C2

Cracking Coefficients

C4

C5

Reliability (CRACK)

Std. Dev.

OK Cancel

$$\log(N) = C1 \cdot \left(\frac{MR}{\sigma}\right)^{C2}$$

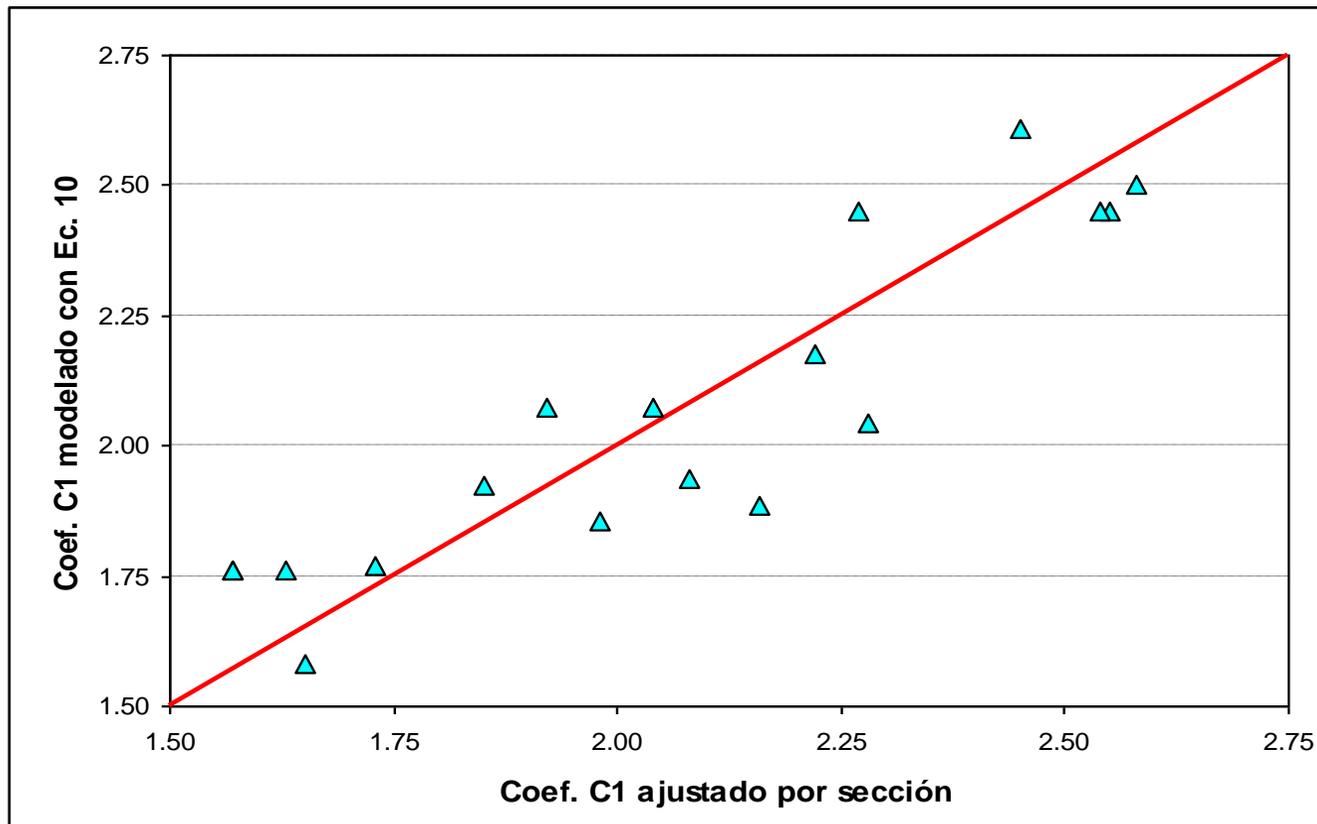
$$CRK = \frac{100}{1 + C4 \cdot FD^{C5}}$$

Correlación C1 vs Variables del modelo

$$C_1 = 2,5338 - 0,0105 \text{ TMI} - 0,1558 \ln(\text{EDAD}) + 0,159 \text{ SUBR}$$

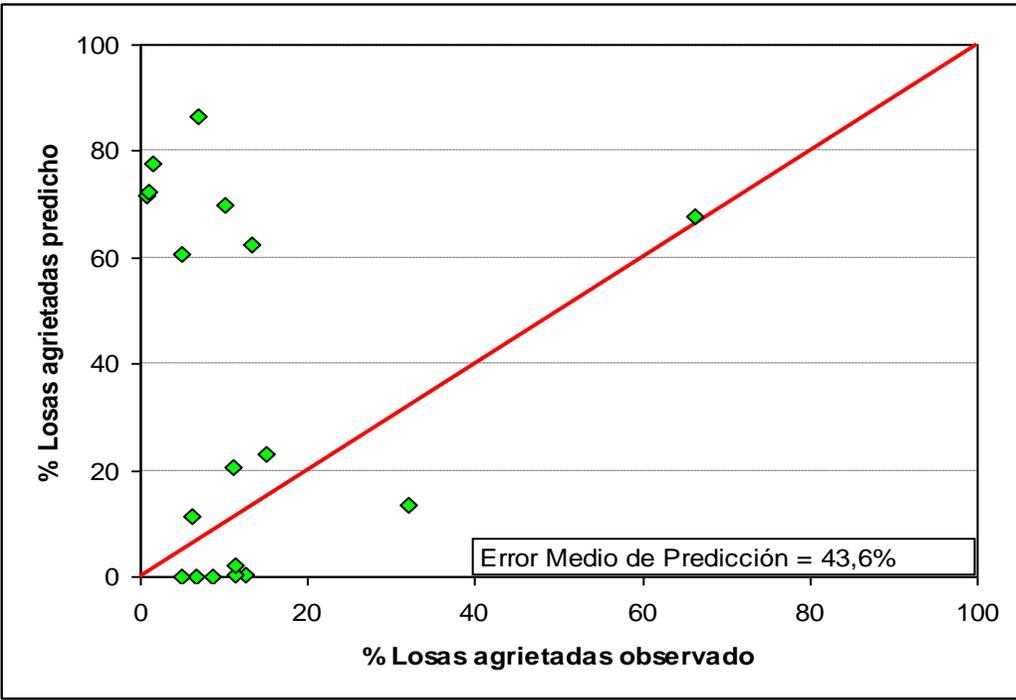
$(18,6) \quad (-6,84) \quad (-3,28) \quad (1,75)$

$$R^2 = 0,78 ; N = 18 ; \text{SEE} = 0,16$$

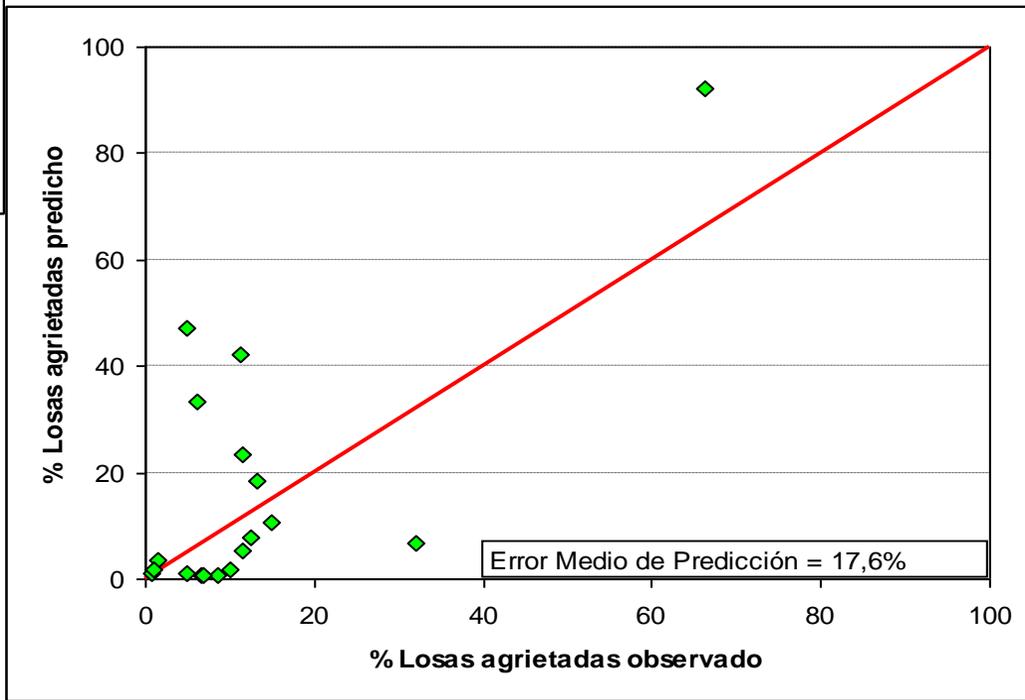


En este caso, la incidencia relativa del tipo de subrasante (fina o granular), de la humedad del clima, y de la edad del pavimento, parecen ser superiores a las que indica el modelo sin calibrar

Mejoras en Predicción de Agrietamiento

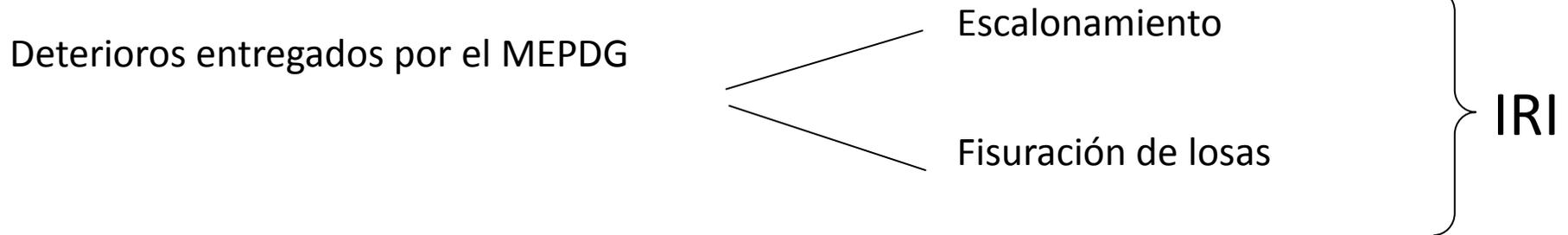


Predicción con modelo sin calibrar



Predicción con modelo ya calibrado

Modelo de rugosidad IRI



$$IRI = IRI_0 + C1 CRK + C2 SPALL + C3 TFAULT + C4 SF$$

$$SF = AGE (1 + 0,5556 FI) (1 + P_{200}) 10^{-6}$$

Deterioro de juntas, SPALL, incorporado en el IRI, no aparece en los reportes de salida del programa → no puede calibrarse individualmente

$$SPALL = \left[\frac{AGE}{AGE + 0,01} \right] \left[\frac{100}{1 + 1,005^{(-12 AGE + SCF)}} \right]$$

Coeficientes Modelo Rugosidad IRI

Distress Model Calibration Settings - Rigid (new)

Punchouts | Faulting | Cracking | IRI-jpcp | IRI-crccp

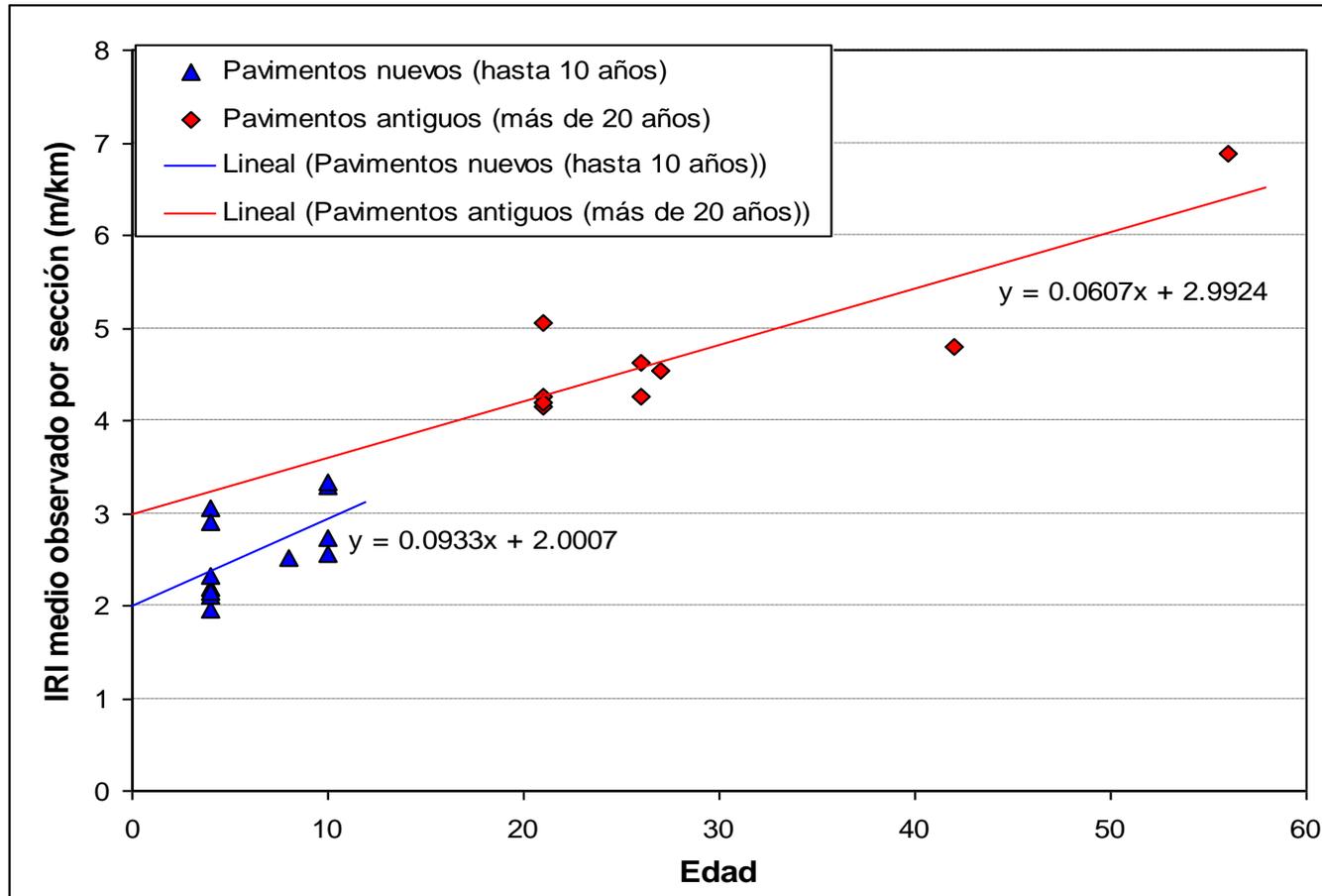
C1 - Cracking
C2 - Spalling
C3 - Faulting
C4 - Site Factor

C1	0.8203
C2	0.4417
C3	1.4929
C4	25.24

Standard deviation initial IRI (in/mile): 5.4

OK Cancel

Ajuste de estimación de IRI inicial (IRI_0)



Se adopta: $IRI_0 = 2$ m/Km para pavimentos “nuevos” (desde los ‘90)

$IRI_0 = 3$ m/Km para pavimentos más viejos

Conclusiones del estudio

- ✓ **Determinación de parámetros representativos de las condiciones locales o regionales para tránsito y clima**
- Se estableció una relación directa entre las configuraciones de vehículos predominantes en Argentina y las que establece por defecto la FHWA (usada por el MEPDG).
- Espectro de cargas: Valores determinados por la EICAM estimativamente. Puede ser mejorada en el futuro con recopilación de datos más actualizados y confiables.
- **Clima: la adaptación realizada es uno de los aportes más importantes realizados por el proyecto. Se configuraron archivos específicos de clima para las diferentes regiones y localidades abarcadas por el estudio.**

Conclusiones del estudio

- ✓ **Calibración de los modelos de deterioro del programa**
- ✓ **Modelo de escalonamiento juntas transv.:** Coeficiente C_6 .
 - Gobierna erosionabilidad y energía de deformación en esquina de losa
 - Buena correlación con precipitaciones, long. losa, subrasante, edad, etc.
 - Reduce a menos de la mitad el error de predicción
- **Modelo de agrietamiento transv. de losas:** Coeficiente C_1 .
 - Valores cercanos al C_1 por defecto ($C_1 = 2,0$).
 - Estimación de C_1 en función de las condiciones de humedad, la edad del pavimento y el tipo de subrasante. Reduce sensiblemente el error de predicción

Conclusiones del estudio

- **Modelo de IRI:** Se usó una regresión lineal.
 - Diferencia significativa entre el IRI inicial de pavimentos nuevos (década del '90) y más antiguos. Tecnologías de alto rendimiento han permitido mejorar la calidad de rodadura en un 30%.
 - Fisuración y el escalonamiento de juntas transversales tendrían mayor influencia sobre el IRI que en el modelo original sin calibrar.

Limitaciones y Futuros Estudios

- Principales limitaciones asociadas al nivel de información con que pudo contarse. Algunos datos fueron de alta calidad y muy detallados (clima), en tanto otros correspondieron a estimaciones globales (tránsito y algunos datos de estructura)
- No obstante, la muestra analizada es representativa del cuadro de situación de pavimentos rígidos en la República Argentina, con pavimentos nuevos (< 10 años), y viejos (entre 25 y 50 años).

Limitaciones y Futuros Estudios

- Se requieren futuros estudios para convalidar los resultados obtenidos en otras condiciones.
 - La mayor parte de las secciones analizadas corresponden a pavimentos rígidos ubicados en zonas llanas, con climas de húmedos a sub-húmedos.
 - Sólo se analizó una ruta con condiciones de clima frío de montaña.
 - No se analizaron pavimentos en zonas de clima húmedo y frío (región patagónica cordillerana), por razones de lejanía y recursos escasos
 - Es recomendable seguir verificando con nuevos datos de campo que incluyan mediciones reales del valor de IRI en pavimentos nuevos, al momento de su habilitación al tránsito