



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

EFECTO DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL EN LA CAPACIDAD VIAL DE AUTOPISTAS Y CARRETERAS MULTICARRIL MEXICANAS

Rafael Gallegos López
Alberto Mendoza Díaz

**Publicación Técnica No 262
Sanfandila, Qro, 2004**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Efecto de la regularidad
superficial en la capacidad vial de
autopistas y carreteras multicarril
mexicanas**

**Publicación Técnica No. 262
Sanfandila, Qro, 2004**

Este documento estuvo bajo la responsabilidad de Rafael Gallegos López y Alberto Mendoza Díaz, quienes como autores agradecen la colaboración de Armando Velázquez Salas, Ileana Cárdenas Freixas, Wilfredo Martínez López del Castillo y Luis Francisco Chapa González, investigadores del Instituto de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Índice

Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1 Introducción	1
2 Selección de las carreteras y de los tramos experimentales del estudio	3
2.1 Determinación del tamaño de la muestra para controlar el error tipo II	3
2.2 Factor de ajuste	4
3 Adición del factor de ajuste a la metodología anterior	7
4 Relación de la regularidad y los costos de operación vehicular	9
5 Conclusiones	17
6 Referencias	19

Resumen

Los procedimientos de estimación de capacidad vial y nivel de servicio asumen la presencia de buenas condiciones de superficie de rodamiento, la cual se evalúa mediante herramientas que miden el perfil longitudinal del camino. El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es la medida estándar de la regularidad superficial de un camino. Dicho índice es la sumatoria, en valor absoluto, de los desplazamientos verticales a lo largo de un intervalo de distancia, dividido entre su longitud.

El efecto de la regularidad superficial se incorpora mediante una adaptación de la metodología estadounidense para autopistas y carreteras multicarril en el Manual de Capacidad Vial de los Estados Unidos (2000), donde el nivel de servicio se evalúa a partir del volumen horario por carril, ajustado por diversos factores, así como de la velocidad de flujo libre, estimada a partir de un valor ideal, reducido según las condiciones de la carretera.

La adaptación introducida consiste en sustituir el factor de reducción de la velocidad por ancho de carril por otro que incluye tanto el ancho de carril, como la regularidad superficial. Este nuevo factor se generó a partir de una serie de mediciones de velocidad de punto, en tramos experimentales mexicanos con distintas combinaciones de valores de ancho de carril y de IRI; también se presentan los análisis estadísticos sobre esta información. El impacto de la modificación introducida en la estimación del nivel de servicio y los costos de operación vehicular, se ejemplifica para algunos casos reales.

Abstract

The procedures for assessing highway capacity and level of service assume that the pavement surface smoothness is good. This aspect, for a road segment, is measured through devices that record the longitudinal profile, from which an index is calculated. The International Roughness Index (IRI) is the standard index for assessing the road surface regularity. The IRI is the summation, in absolute value, of the vertical displacements in the segment profile, divided by the length of the segment.

In this work, the surface smoothness effect is incorporated through a modification of the methodology for assessing capacity and level of service for freeways and multilane highways in the Highway Capacity Manual of the United States (2000), where the level of service is assessed from the lane hourly volume, adjusted by several factors, as well as from the free flow speed, which can be approximated based on an ideal value, reduced according to the conditions of the road.

The modification introduced consists in substituting the speed reduction factor for lane width by another which includes jointly lane width and surface smoothness. This new factor is generated from spot speeds measured in Mexican experimental segments with different combinations of lane width and IRI. The statistical analyses carried out on this information are also shown. The impact of the modification introduced in the estimation of level of service and vehicle operating costs is also illustrated in some real world cases.

Resumen ejecutivo

1. Introducción

El transporte carretero es el medio más importante en el rubro de pasajeros y carga en México. De lo anterior se desprende el impacto económico que tiene para el país la ampliación y el mejoramiento de su red carretera, ya sea mediante obras de conservación, de modernización o de construcción de nueva infraestructura.

Cualquiera de los tipos anteriores de obra tiene por objeto mejorar el nivel de servicio a los usuarios. Frecuentemente esto último se efectúa a través de un análisis de capacidad vial, a partir del que también suele evaluarse la conveniencia de llevar a cabo las mejoras en un momento determinado. Sin embargo, los procedimientos de estimación de capacidad vial y nivel de servicio, asumen que existen buenas condiciones de superficie de rodamiento.

2. Desarrollo del trabajo y resultados

La condición de la superficie de rodamiento se evalúa mediante herramientas que miden el perfil longitudinal del camino, el cual posteriormente se analiza para obtener un indicador de regularidad superficial. El Índice Internacional de Rugosidad (IRI por sus siglas en inglés) se aceptó desde 1986 por el Banco Mundial como estándar de medida de la regularidad superficial de un camino (ref 1). Dicho índice es la sumatoria, en valor absoluto, de los desplazamientos verticales a lo largo de un intervalo de distancia, dividido entre la longitud del mismo.

Ignorar el efecto de la regularidad superficial suele resultar en una sobrevaluación del nivel de servicio real, lo cual generalmente retrasa la justificación de las obras de mejoramiento, con las consecuentes pérdidas económicas y de funcionalidad. Por esta razón se decidió, como propósito del presente trabajo, incorporar el efecto de la condición de la superficie de rodamiento en la estimación de la capacidad, y el nivel de servicio de las autopistas y carreteras multicarril mexicanas que forman parte importante de la red principal del país. En México, donde el 30% de las carreteras principales tienen estado superficial deficiente, ignorar el efecto anterior perjudica la gestión de los presupuestos necesarios para la realización oportuna de las obras de mejoramiento requeridas.

La incorporación mencionada se efectúa mediante una modificación de la metodología estadounidense para autopistas y carreteras multicarril en el Manual de Capacidad Vial de los Estados Unidos (2000), donde el nivel de servicio se evalúa a partir del volumen horario por carril, ajustado por el factor de hora pico, la presencia de vehículos pesados, el tipo de población conductora, así como de la velocidad de flujo libre, la cual puede estimarse a partir de un valor ideal, reducido según el tipo de faja separadora central, la presencia de obstáculos laterales, la densidad de accesos y el ancho de carril.

La adaptación introducida consiste en sustituir el factor de reducción de la velocidad por ancho de carril, por otro que incluye conjuntamente el ancho de carril y la regularidad superficial. Este nuevo factor se generó a partir de una serie de mediciones de velocidad de punto en tramos experimentales mexicanos con distintas combinaciones de valores de ancho de carril e Índice Internacional de Rugosidad.

Inicialmente se determinó, para diferentes anchos de carril, el tamaño de la muestra de tramos en los que se tomarían velocidades, procediéndose posteriormente a recopilar esta información. Posteriormente se realizó un conjunto de análisis estadísticos de regresión sobre la información recopilada, para justificar el procedimiento adoptado y determinar los nuevos factores de ajuste de la velocidad por ancho de carril y regularidad superficial. En la siguiente tabla se presentan los nuevos factores así obtenidos:

Reducción de velocidad por IRI, y ancho de carril (en km/h)			
IRI	Ancho de carril (m)		
	3.30	3.50	3.65
2.5	10.25	5.71	0.00
3	13.53	8.67	2.70
4	20.18	14.71	8.13
5	26.94	20.91	13.82
6	33.83	27.28	19.77
7	40.83	33.80	25.98
8	47.95	40.48	32.45
9	55.19	47.33	39.18
10	62.55	54.33	46.17
11	70.03	61.50	53.42
12	77.63	68.83	60.93

Para ejemplificar el impacto de la modificación introducida, considérese el tramo de 12 km en la carretera Querétaro-San Luis Potosí, del km 78+000 al 90+000, que se encuentra en condiciones no óptimas en cuanto a calidad de la superficie de rodamiento se refiere, promediando un Índice de Rugosidad Internacional igual a 4 m/km.

El tramo anterior cuenta con un TPDA de 46,910 unidades por día por año. Su composición vehicular contiene un 46% de ligeros y un 54 % de pesados. El factor horario de máxima demanda es de 0.90, y el factor "K" de proporción de hora pico del TPDA corresponde a 0.067; además de contar con distribución direccional de 0.55 para el sentido mayor. Como características geométricas destaca que la vía está dividida con faja separadora central; cuenta con dos carriles por sentido, de 3.50 m de ancho promedio; y acotamientos de 1.80 m a ambos lados en cada sentido. Como tipo de conductor se considera el habitual por contar con fuerte presencia de vehículos pesados operados por gente experimentada, y por tratarse de una carretera principal.

Si para este tramo no se considera la regularidad superficial, se obtiene una velocidad de flujo libre estimada igual a 89 km/h, mediante la siguiente fórmula:

$$FFS = FFS_1 - F_M - F_{LC} - F_A - F_{AC}$$

Donde:

FFS = velocidad de flujo libre estimada (km/h)

FFS₁ = velocidad de flujo libre estimada (km/h), para condiciones ideales

F_M = ajuste por el tipo de faja separadora central

F_{LC} = ajuste por obstáculos laterales

F_A = ajuste por puntos de acceso

F_{AC} = ajuste por ancho de carril (3.50 m), que para este caso es igual a 17.37

Ingresando con la velocidad así obtenida a los criterios correspondientes del Manual de Capacidad Vial de los Estados Unidos (2000), se obtiene una densidad de 13 vehículos ligeros/km/carril y un nivel de servicio "C" para el tramo considerado.

Si en la fórmula anterior, en vez de F_{AC} se aplica el factor F_{PAC} de ajuste por ancho de carril y estado superficial del pavimento (14.71 en la tabla mostrada, para un IRI igual a 4 y un ancho de carril de 3.50 m), se obtiene una velocidad de flujo libre estimada igual a 75.38 km/h, para la cual se obtiene una densidad de 16 vehículos ligeros/km/carril y un nivel de servicio "D".

Como es evidente, el impacto logrado es un efecto más congruente con la situación real, indicativo de que es oportuno emprender ya acciones de mejoramiento en aras de un nivel de servicio aceptable.

Este trabajo tiene como antecedente, otro realizado exclusivamente para carreteras multicarril mexicanas (ref 2).

Referencias

- 1 Arriaga Patiño, Mario C, y P Garnica Anguas, *Índice Internacional de Rugosidad, aplicación en la Red Carretera de México*. Instituto Mexicana del Transporte, IMT, Publicación Técnica No 108, Sanfandila, Qro (1998).
- 2 Gallegos López, R. *Efecto del estado superficial en la capacidad vial en carreteras multicarril*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, NL (1998).

1 Introducción

En México el transporte carretero es el medio más importante en el rubro de pasajeros y carga movilizados a lo largo del territorio nacional; se comprende la trascendencia estratégica que tiene para la economía del país la conservación de la infraestructura carretera, y la necesidad de incrementar su longitud. Es por ello que un sistema eficiente de carreteras es imprescindible para el desarrollo económico del país en su conjunto, razón por la cual la construcción, rehabilitación y conservación de esas vías tendrá como uno de sus objetivos, proporcionar a los usuarios una infraestructura vial capaz de soportar tanto las necesidades de movimiento vehicular que se genera en la actualidad, como la demanda a futuro, en forma segura y funcional.

La eficiencia de esta red o sistema de carreteras, tanto en su estructura como en su superficie de rodamiento, se mejorará a través de buenos diseños de pavimentos, con la implantación de sistemas adecuados de administración de pavimentos que mantengan las carreteras (por lo menos la red troncal) en condiciones de operación satisfactorias. Hay que considerar que en el área de las carreteras, los análisis de capacidad y nivel de servicio son un punto importante en la etapa estratégica de la planeación por ser elementos primordiales en la toma de decisiones en ampliaciones, construcción, mantenimiento, conservación y operación de las mismas.

Es primordial el estudio de la capacidad vial en los distintos tipos de vías, como instrumento básico para el análisis del tránsito porque permite comprender las posibilidades de los distintos tipos de infraestructura vial para sobrellevar el tránsito con fluidez. El concepto de capacidad se define como el valor de flujo máximo horario en el cual en forma razonable puede esperarse que las personas y los vehículos pasen por un punto o un tramo uniforme de un carril o de un camino durante un período de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, del camino y de sus controles. La definición de capacidad asume que existen condiciones de clima y pavimento buenos.

La regularidad superficial es la característica más percibida por el usuario, ya que afecta a la comodidad; desgaste de los vehículos; consumo de energía; probabilidad de dañar a las mercancías transportadas; y finalmente puede propiciar accidentes. La comodidad depende principalmente del vehículo, del alineamiento horizontal, y del perfil longitudinal de la carretera. La mayor parte de los sistemas miden el perfil directamente, y después se analiza para obtener un indicador de la regularidad superficial. El Índice de Regularidad o Rugosidad Internacional (IRI) se aceptó como estándar de medida sobre la regularidad superficial de un camino por el Banco Mundial desde 1986 (ref 1); su obtención es posible correlacionarla con cualquier equipo de medición de la uniformidad de un pavimento. El índice de regularidad establecido fue la sumatoria en valor absoluto de los desplazamientos verticales para un intervalo de distancia dividido por la longitud del intervalo. Es un parámetro fundamental de la calidad del pavimento, e influye directamente en su condición superficial, en el costo de operación vehicular, y la comodidad y seguridad del usuario; también refleja la condición estructural del camino.

En este trabajo se describe el procedimiento para efectuar la incorporación mencionada; es una adaptación de la metodología estadounidense contenida en el Manual de Capacidad Vial (2000) (ref 2). En esa metodología, el nivel de servicio se evalúa a partir del volumen horario por carril, ajustado por el factor de hora pico, la presencia de vehículos pesados y el tipo de población conductora, así como de la velocidad de flujo libre, la cual puede estimarse a partir de un valor ideal, reducida según el tipo de faja separadora central, la presencia de obstáculos laterales, la densidad de accesos y el ancho de carril.

La adaptación introducida consiste en sustituir el factor de reducción de la velocidad por ancho de carril, por otro que incluye conjuntamente el ancho de carril y la regularidad superficial. Este nuevo factor se generó a partir de una serie de mediciones de velocidad de punto en tramos experimentales mexicanos, con distintas combinaciones de valores de ancho de carril e Índice Internacional de Rugosidad.

Inicialmente se describe la selección de los tramos experimentales, así como el cálculo del tamaño de la muestra de velocidades a tomar en ellos, y la recopilación de información. Posteriormente se presentan los análisis estadísticos efectuados sobre esta información para justificar el procedimiento adoptado, y determinar los nuevos factores de ajuste de la velocidad por ancho de carril y regularidad superficial. Finalmente, se ejemplifica el impacto de la modificación introducida en la estimación del nivel de servicio y los costos de operación vehicular en algunos casos reales.

2 Selección de las carreteras y de los tramos experimentales del estudio

Se seleccionaron tramos de autopistas y carreteras multicarril de distintas regiones de México, para observar el efecto en la reducción de velocidad de flujo libre por causa de la regularidad superficial del pavimento, y del ancho de carriles. Para esto, se llevaron a cabo estudios de velocidad de punto en secciones de tramos carreteros que cuenten con condiciones ideales de pendiente nula, alineamiento horizontal recto, y tasa de volumen bajo, menor a 1,400 vehículos ligeros por hora y por carril.

Se analizaron carreteras representativas del país en la región norte, centro y sur, en las entidades federativas que más influyen económicamente y en el flujo vehicular (Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro).

La selección de las secciones a estudiar se realizó con base en las características necesarias para analizar dicho efecto aislando todas las variables de las que depende la velocidad, y dejar sólo los parámetros de rugosidad y anchos de carril en distintas condiciones para evaluar a partir de ahí su efecto en la reducción de velocidad.

2.1 Determinación del tamaño de la muestra para controlar el error tipo II

Se realizó el muestreo aleatorio para obtener las estimaciones requeridas de acuerdo con los valores preseleccionados: nivel de significancia, o error tipo I $\alpha=0.05$; y un error tipo II $\beta=0.05$. La estimación de la desviación estándar de los datos de velocidad se denota como σ_y , mientras que la desviación estándar estimada de los datos del IRI se representa mediante σ_x . Los resultados se resumen en la tabla 2.1, en donde la última columna contiene la evaluación de la potencia de la prueba estadística $(1-\beta)$ para los tamaños de muestra (n), que se preseleccionaron:

Tabla 2.1
Resultados del análisis estadístico para el tamaño de muestra

Ancho	n	σ_y	σ_x	$\beta 1$	Potencia
3.30	34	17.6420	2.2729	-6.821	0.9979
3.50	36	17.2769	2.4321	-6.392	0.9990
3.65	26	13.6567	2.1582	-5.881	0.9934

Se puede observar que dichos tamaños de muestra para cada ancho de carril son excesivos ya que en los tres casos la potencia sobrepasa el valor preseleccionado $1-\beta = 0.95$, por tanto, no fue necesario incrementar los tamaños de muestra.

2.2 Factor de ajuste

Verificado el tamaño de la muestra para el error de nivel de confianza establecido estadísticamente, y con toda la información de campo levantada se procedió al ajuste de los datos. Se graficaron en la fig 2.1 todos los valores de velocidad con su correspondiente Índice de Rugosidad Internacional, para cada ancho de carril seleccionado.

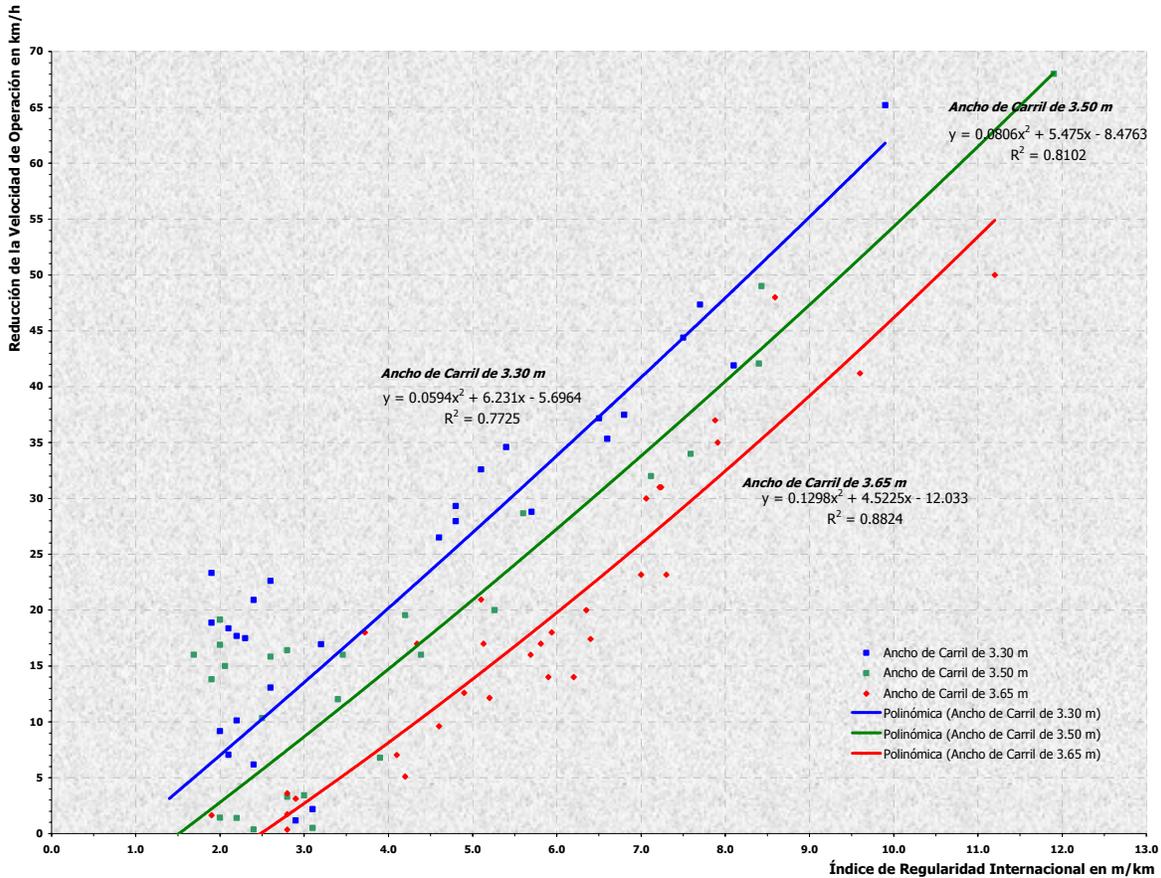


Figura 2.1
Reducciones de velocidad por el efecto de la rugosidad del pavimento para distintos anchos de carril

Las ecuaciones de las curvas quedan como se muestra en la tabla 2.2:

Tabla 2.2
Curvas de ajuste cuadrático de los datos de campo

Ancho carril	Ajuste cuadrático	r2
3.30	$y = 125.7 - 0.0594 x^2 - 6.231 x$	0.7725
3.50	$y = 128.48 - 0.0806 x^2 - 5.475 x$	0.8102
3.65	$y = 132.03 - 0.1298 x^2 - 4.5225 x$	0.8824

Para efecto de análisis, esta reducción de velocidad se obtiene con la tabulación de los datos resultantes de la ecuación para condiciones distintas de rugosidad. Las tabulaciones se muestran en la tabla 2.3:

Tabla 2.3
Factor de reducción de velocidad de operación debido a la rugosidad del pavimento y al ancho de carril (F_{PAC})

Reducción de velocidad por IRI y ancho de carril (en km/h)			
IRI	Ancho de carril (m)		
	3.30	3.50	3.65
2.5	10.25	5.71	0.00
3	13.53	8.67	2.70
4	20.18	14.71	8.13
5	26.94	20.91	13.82
6	33.83	27.28	19.77
7	40.83	33.80	25.98
8	47.95	40.48	32.45
9	55.19	47.33	39.18
10	62.55	54.33	46.17
11	70.03	61.50	53.42
12	77.63	68.83	60.93

3 Adición del factor de ajuste a la metodología anterior

El ajuste a la metodología actual se realiza sustituyendo el factor de ajuste a la velocidad por efecto del ancho de carril (F_{AC}), por el factor de reducción de la velocidad por efecto de la regularidad y ancho de carril, denominado como F_{PAC} (Pavimento y Ancho de Carril) y obtenido según se indicó en el capítulo anterior. Una vez calculado, la estimación de la velocidad de flujo libre queda como:

$$FFS = FFS_1 - F_M - F_{LC} - F_A - F_{PAC}$$

Donde:

FFS = velocidad de flujo libre estimada (km/h)

FFS_1 = velocidad de flujo libre estimada (km/h), para condiciones ideales

F_M = ajuste por el tipo de faja separadora central

F_{LC} = ajuste por obstáculos laterales

F_A = ajuste por puntos de acceso

F_{AC} = ajuste por ancho de carril

Para la velocidad así obtenida

F_{PAC} se obtiene directamente de la tabulación determinada en la sección anterior, y para el valor del factor de ajuste F_{PAC} , únicamente se debe entrar con el ancho de carril, según sea el caso analizado, hasta topar con el valor de rugosidad en términos de IRI en m/km, determinando el valor de dicho factor. El resto de la metodología permanece inalterable, lo que constituye una ventaja para su aplicación por los especialistas encargados de los análisis de capacidad de carreteras.

A manera de ejemplificar la aplicación de este factor en el procedimiento actual se procede a realizar un análisis de capacidad vial en un tramo de 12 km en la carretera Querétaro-San Luis Potosí, del km 78+000 al 90+000, que se encuentra en condiciones no óptimas en cuanto a calidad de la superficie de rodamiento se refiere, promediando su Índice de Rugosidad Internacional igual a 4 m/km. Este se evalúa por la metodología del manual de capacidad vial sin ajuste, y después con el ajuste propuesto en este capítulo, estableciendo una comparación entre los resultados.

El tramo en estudio cuenta con un TPDA de 46,910 unidades por día por año. Su composición vehicular contiene un 46% de ligeros y un 54 % de pesados. El factor horario de máxima demanda es de 0.90, y el factor "K" de proporción de hora pico del TPDA corresponde a 0.067; además de contar con distribución direccional de 0.55 para el sentido mayor. Se encuentra en el estado de Guanajuato, en donde el tipo de terreno promedio general del tramo es el de plano.

Como características geométricas destaca que dicha vía está dividida con faja separadora central; cuenta con dos carriles por sentido, de 3.50 m de ancho promedio; y acotamientos de 1.80 m a ambos lados en cada sentido. Como tipo de conductor se considera el habitual por contar con fuerte presencia de vehículos pesados operados por gente experimentada, y por tratarse de una carretera principal.

Se estudia el mismo tramo, bajo las mismas condiciones; lo único que diferencia al análisis inicial es la intervención de dicho factor en la reducción de velocidad. Así, de contar con un flujo libre de 89 km/h, se llega a una velocidad de flujo libre resultante de 75.38 km/h. Entonces, la densidad se ve proporcionalmente afectada, aumentando de 13 a 16 vehículos ligeros/km/carril para el primer y segundo caso respectivamente. Esto provoca que el nivel de servicio caiga de uno que parece ser de "C" a un verdadero nivel de servicio "D", que es el que ofrece la vía según las velocidades presentes.

4 Relación entre la regularidad y los costos de operación vehicular

Los costos que cualquier país debe enfrentar durante toda la vida útil de un camino, se dividen en tres clases:

1. Costos iniciales de construcción, que implican la realización de un proyecto
2. Costos de conservación, o sea aquellos que abarcan las inversiones para mantener el camino en buenas condiciones, así como de conservar la calidad de servicio al usuario, enfrentando el probable crecimiento en la demanda
3. Costos de operación, que se producen cotidianamente por la circulación en dicho camino

El estado superficial de un camino incide directamente en aspectos tales como:

1. Costos de operación de los vehículos
2. Calidad de manejo; comodidad
3. Seguridad de los usuarios al transitar por las carreteras
4. Las cargas dinámicas que transmiten los vehículos, que a su vez afectan al pavimento

Con ayuda de la herramienta computacional VOC (Vehicle Operating Cost, por sus siglas en inglés) se pueden obtener los costos de operación vehicular para tramos de autopistas y carreteras multicarril con condiciones distintas de rugosidad. El análisis da la evidencia del incremento de los costos de operación a medida en que aumenta la rugosidad del tramo. Los resultados graficados pueden apreciarse en las figs 4.1 y 4.2.

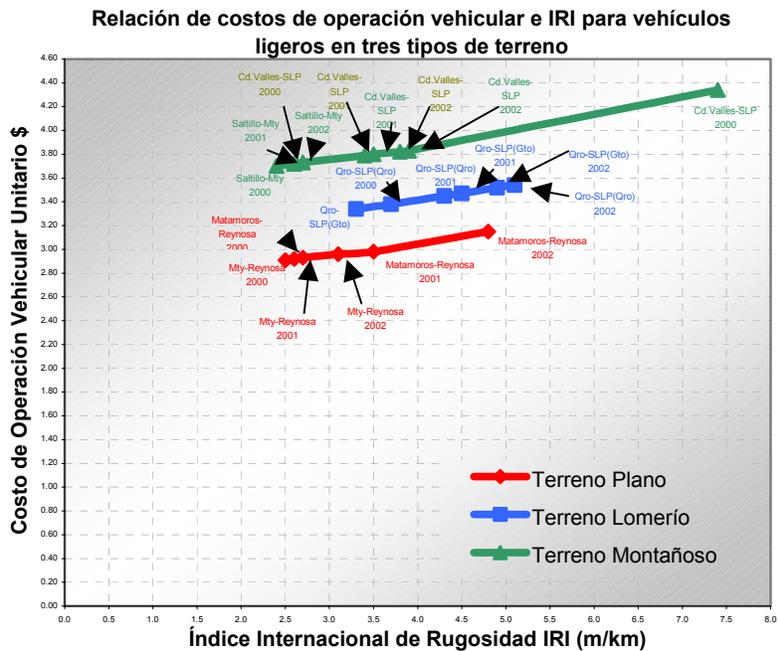


Figura 4.1
Variación de los costos de operación vehicular por efecto de la rugosidad del pavimento para vehículos ligeros

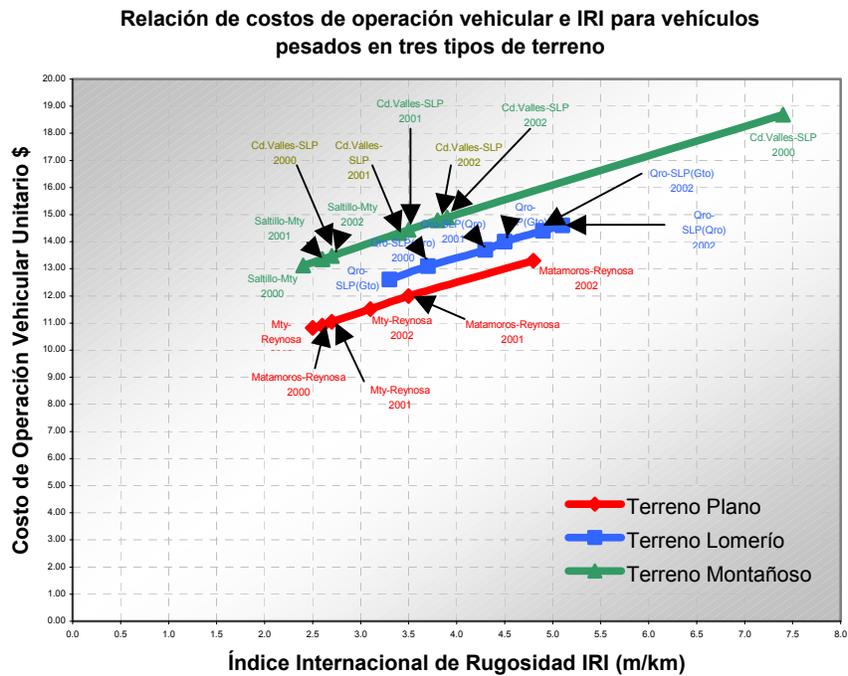


Figura 4.2
Variación de los costos de operación vehicular por efecto de la rugosidad del pavimento para vehículos pesados

A partir del programa VOC se desarrolló un conjunto de gráficas con la variación de los costos de operación vehicular respecto a distintas condiciones del pavimento, medidas a través del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Se construyeron para nueve tipos de vehículos (tres ligeros, un autobús, dos camiones, y tres tractocamiones articulados), en tres distintos tipos de terreno (sensiblemente plano, lomerío y montañoso).

En todos los tipos de terreno se proponen características de carretera iguales: en las condiciones de vía pavimentada, proporción de viaje ascendente del 50%, altitud del terreno de 0 m, y número efectivo de carriles de más de uno.

Las características que varían para cada tipo de terreno son la pendiente ascendente y descendente, así como la curvatura promedio. En el caso del terreno plano, se propone una pendiente ascendente y descendente de hasta 1.5%, y una curvatura promedio máxima de 200°/km. Para el terreno tipo lomerío, se proponen 1.5 a 5% como pendientes ascendentes y descendentes, y curvatura promedio de 200 a 600°/km. En el caso del terreno montañoso, se propone 5% en las pendientes ascendente y descendente, y 600°/km en la curvatura promedio.

Para representar las condiciones de una carretera de carriles múltiples se maneja en los datos de entrada del programa una velocidad deseada de 110 km/h, que es el límite de este tipo de vías en México; con ello se simula la condición de autopista y carretera de carriles múltiples.

Los valores del Índice de Rugosidad Internacional fluctuaron en un rango de 1 a 15 m/km, para observar la variación de los costos de operación vehicular. En las figs 4.3 y 4.4 se presentan las variaciones del costo de operación vehicular unitario en función del IRI para cada clase de vehículo en tres tipos de terreno.

El sobrecosto de operación vehicular resulta de la diferencia de los montos de operación vehicular totales anuales en la condición actual, menos los costos en la situación ideal de un pavimento en buenas condiciones (IRI = 2.5 m/km). Se considera el valor de IRI de 2.5 m/km por referirse generalmente a una carretera nueva o recién mejorada. Esto queda de la siguiente manera:

$$\text{Sobrecosto de operación} = \text{Costo anual total}_{(IRI \text{ actual})} - \text{Costo anual total}_{(IRI=2.5)}$$

que es el excedente del costo de operación vehicular por tener un valor de IRI mayor de 2.5.

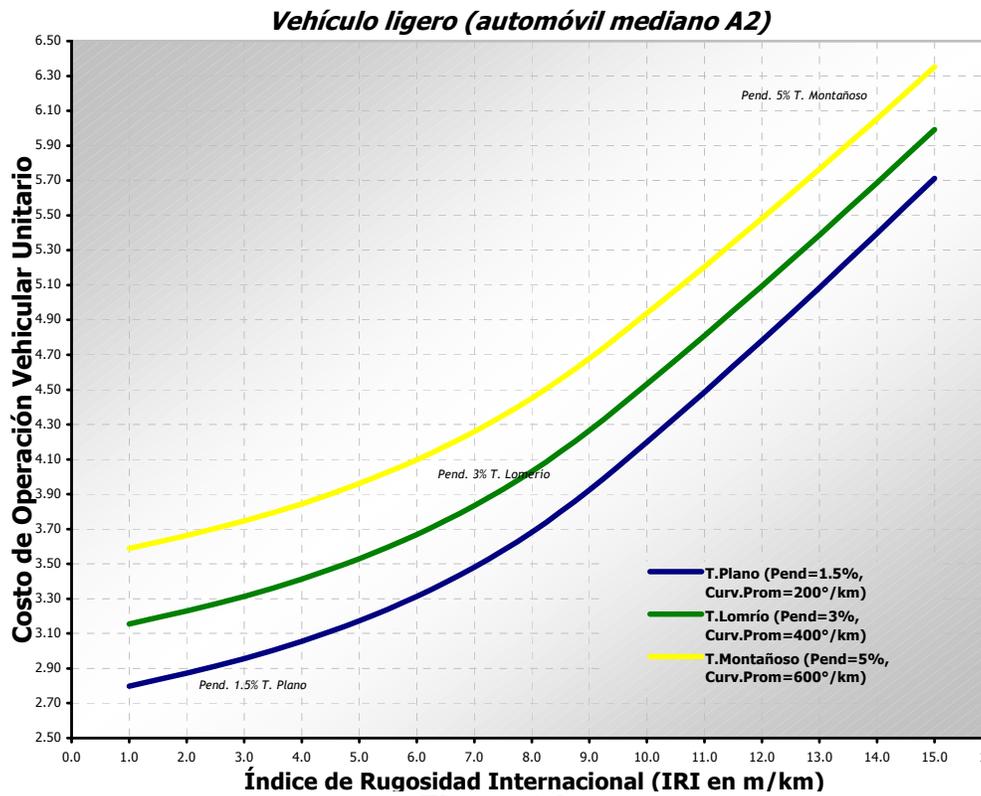


Figura 4.3

Relación de costo de operación vehicular vs Índice Internacional de Rugosidad para vehículos ligeros medianos

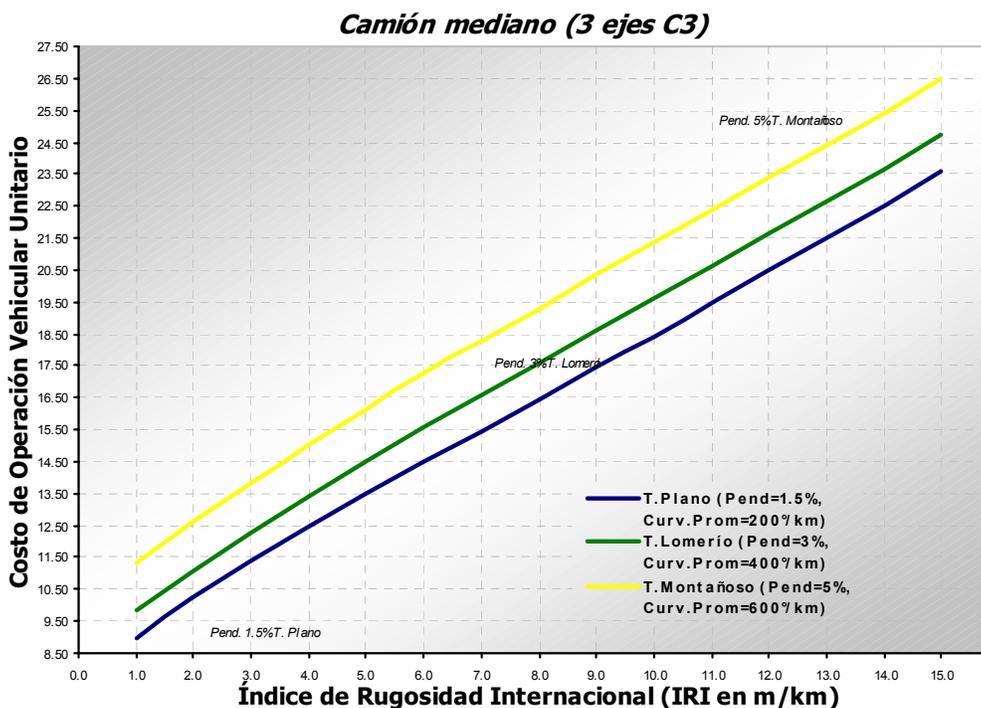


Figura 4.4

Relación de costo de operación vehicular vs Índice Internacional de Rugosidad para vehículos pesados medianos de tres ejes

Para apreciar mejor este efecto, se presenta a continuación la valoración de los sobrecostos de operación vehicular para una carretera de Nuevo León.

Considérese el tramo del municipio de Linares a la Cd de Monterrey, de la carretera Cd Victoria-Monterrey, en la red federal carretera de México. Este tramo presenta una topografía de lomerío, con pendientes promedio de 5.23%. Se estudió una sección deteriorada de 7 km. Los volúmenes de tránsito promedio diario anual (TPDA) para el 2002 se muestran en la tabla 4.1, con su correspondiente composición vehicular:

Tabla 4.1
TPDA y clasificación del tránsito vehicular en el tramo Linares-Monterrey

TPDA ambos sentidos 20,531						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
79.60%	4.55%	5.60%	3.05%	2.75%	2.05%	2.40%

Los vehículos tipo A corresponden a automóviles; los tipo B, autobuses; los tipo C, camiones no articulados de dos y tres ejes. Los siguientes tres tipos corresponden a los tractocamiones articulados con cinco y seis ejes, además de un tractocamión doblemente articulado de nueve ejes.

Esta carretera presenta en los tramos mencionados, un Índice de Rugosidad Internacional promedio de 5.23m/km. Por tanto, se analizarán los costos de operación vehicular para condiciones óptimas de regularidad, correspondientes a un IRI de 2.5 m/km, además de los costos de operación para diferentes estados superficiales del pavimento, proponiendo una condición de regularidad muy pobre, con un IRI de 10 m/km. Todo esto para observar la variación de los montos de operación y los sobrecostos que arroja no conservar el tramo carretero en sus condiciones óptimas. En un principio se obtienen los volúmenes de tránsito promedio diario anual para cada tipo de vehículo, según el TPDA del tramo y la clasificación vehicular mostrada (tabla 4.2).

Tabla 4.2
TPDA por tipo de vehículo

TPDA	TPDA POR TIPO DE VEHÍCULO						
	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
20,531	16,343	934	1,150	626	565	421	493

Después se obtienen los factores de costos de operación a partir de las gráficas con los resultados del programa VOC; ubicando estos factores según la clase de vehículo y condición del pavimento en el tipo lomerío (tabla 4.3).

Tabla 4.3
Factores de costos de operación vehicular base, en terreno lomerío

Carretera Linares-Monterrey	IRI	FACTOR DE COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR BASE						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Pavimento excelente	2.50	1.28	1.19	1.51	1.39	1.39	1.38	1.50
Situación actual	5.23	1.39	1.36	2.03	1.75	1.62	1.62	1.74
Pavimento muy dañado	10.00	1.78	1.77	2.80	2.32	1.97	2.00	2.14

Lo siguiente es obtener los costos de operación vehicular base en valor monetario; se deducen del programa VOC al ejecutarlo las veces necesarias para cada tipo de vehículo en las condiciones previamente descritas para el caso base. Los resultados se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4
Costos de operación vehicular base en valor monetario por vehículo por km

A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
\$2.55	\$8.78	\$5.47	\$8.43	\$16.58	\$18.18	\$20.84

Los costos de operación anuales totales por clasificación vehicular en valor monetario, se obtienen multiplicando el factor de costo de operación de cada condición de terreno y tipo de vehículo, por el costo de operación base del vehículo, por el TPDA clasificado en tipo de vehículo, por 365 días, y por 7 km como longitud del tramo. Se muestran en la tabla 4.5 los resultados.

Tabla 4.5
Costos de operación vehicular anuales en todo el tramo carretero, en valor monetario

IRI	COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR ACTUALES POR AÑO (millones de pesos)						
	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2.50	\$136.47	\$24.93	\$24.28	\$18.75	\$33.24	\$26.99	\$39.35
5.23	\$148.20	\$28.50	\$32.64	\$23.61	\$38.74	\$31.68	\$45.65
10.00	\$189.27	\$37.18	\$45.03	\$31.36	\$47.13	\$39.14	\$56.04

Si se suman los costos de operación vehicular anuales, de todos los tipos de vehículo, se obtiene el total de erogación de la carretera por año, para cada condición de pavimento, o sea para cada valor de IRI propuesto. Con ayuda de estos valores se pueden estimar los sobrecostos de operación debidos al incremento del mal estado del

pavimento, en comparación de las condiciones óptimas si existiera un pavimento excelente. Estos resultados se muestran en la tabla 4.6.

Con dicha estimación aproximada es factible calcular, que en el tramo Linares-Monterrey de 7 km (carretera federal Cd Victoria-Monterrey), un pavimento en muy malas condiciones cuesta administrativamente su operación del orden de 445 millones de pesos en exceso del monto de operación normal en un buen pavimento. En la situación actual, la erogación por la condición de la carpeta, redundo en sobrecostos del orden de 349 millones de pesos. Es fácil verificar que únicamente el sobrecosto de operación por un mal estado, dentro de límites realistas, puede llegar a significar al país una cifra total anual que en muy pocos años iguala al gasto total de construcción del tramo.

Tabla 4.6
Costos totales anuales de operación y sobrecostos
por condiciones adversas en el pavimento

Carretera Linares-Monterrey	IRI	COSTO DE OPERACIÓN VEHICULAR TOTAL POR AÑO (millones de pesos)	SOBRECOSTOS DE OPERACIÓN DEBIDO A LA REGULARIDAD DEL PAVIMENTO ANUALES, (millones de pesos)	SOBRECOSTOS DE OPERACIÓN DEBIDO A LA REGULARIDAD DEL PAVIMENTO ANUALES, (porcentaje)
Pavimento excelente	2.50	\$304.00	\$0.00	0%
Situación actual	5.23	\$349.00	\$45.00	15%
Pavimento muy dañado	10.00	\$445.16	\$141.15	46%

Nótese que el incremento porcentual en el costo de operación al transitar sobre caminos progresivamente deteriorados, es sustancialmente mayor en las unidades pesadas que en las ligeras. Por ejemplo, en el caso extremo la operación del camión de dos ejes pasa de 34% más de su monto base en la situación actual del camino, alcanzando un 85% de incremento, o sea casi el triple cuando recorre una vía en muy mal estado.

Si este monto es mayor que el de rehabilitación o de conservación del tramo en estudio, se puede determinar que la mejora propuesta es rentable. De no ser así, es decir, que sea menor que los costos de rehabilitación o de conservación, entonces la mejora no es rentable.

5 Conclusiones

Las siguientes son algunas conclusiones que se consideran relevantes en este trabajo:

1. El estudio de la capacidad vial, como instrumento básico para análisis del tránsito, ha sido primordial al permitir un claro entendimiento de las posibilidades de los distintos tipos de infraestructura vial para sobrellevar el tránsito con fluidez. Permite saber cómo es que opera dicha infraestructura, y da elementos para mejorarla, diseñarla y planificarla, mediante una serie de alternativas, y dar un servicio cómodo, seguro y eficiente.
2. El Manual de Capacidad Vial de los Estados Unidos es el mejor y más completo esfuerzo para obtener una herramienta que permita entender el fenómeno del tránsito. Ha sido la primera teoría, modelo, norma y estándar con el que la técnica de la Ingeniería de Tránsito ha podido desarrollar su labor en los últimos 40 años. Su uso se extiende a los consultores y proyectistas, centros de estudio y administraciones, de todos los niveles en los distintos países.
3. Dado que los procedimientos del Manual proporcionan una base consistente y sistemática para obtener la capacidad y la calidad de servicio de los distintos elementos en el sistema de transporte, y que dichos procedimientos se han desarrollado en un amplio rango de estudios de investigación, los cuales reflejan la experiencia de la manera de conducir de los estadounidenses y puede no ser representativa de la operación del tránsito, del transporte y de los peatones en otras partes del mundo, es necesario calibrar o adaptar los factores que intervienen en el análisis de tal forma que reflejen la forma de manejar para su utilización en el país, a fin de que los resultados indiquen las condiciones de operación reales.
4. En ninguna parte del Manual de Capacidad Vial de los Estados Unidos se hace referencia al estado del pavimento como determinante en las velocidades de operación o en la capacidad vial.
5. Las observaciones en las carreteras de México demuestran una relación entre la regularidad del pavimento y la velocidad de operación vehicular.

Las refs 3 a 68 son trabajos que sirvieron de base para los desarrollos presentados en este documento.

6 Referencias

1. **Sayers Michael W, Gillespie Thomas D, V. Queiroz Cesar A.** The International Road Roughness Experiment. Technical Paper 45. Banco Mundial (1986).
2. **Institute of Transportation Engineers.** Highway Capacity Manual, Actualization 2000. National Research Council. Washington, DC (2000).
3. **Aguerreberre Salido R, Cepeda Narváez F.** Elementos de proyecto y costos de operación en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 20. Querétaro, Qro (1991).
4. **Aguerreberre Salido R, Cepeda Narváez F.** Estado superficial y costos de operación en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 30. Querétaro, Qro (1991).
5. **Al-Balbissi Adli H.** Economics of Pavement Condition, Axle Load, and Vehicle Operating Costs. ITE Journal (May 1991).
6. **Allen Jr William G.** Forecasting the Cost of Driving. ITE Journal (Feb 1996).
7. **American Concrete Pavement Association.** The International Roughness Index (IRI): What is it? How is it Measured? What do you need to know about it?. R&T Update Concrete Pavement Research & Technology (Ago 2002).
8. **Anastasio Vázquez Vázquez, Rafael Gallegos López.** Investigación de capacidad vial bajo condiciones ideales en carreteras multicarril del estado de Nuevo León. UANL-FIC. Monterrey (1992).
9. **Archondo-Callao Rodrigo.** VOC, Model Manual. The Highway Design and Maintenance Standards Series. Banco Mundial (1989).
10. **Archondo-Callao Rodrigo.** Methods for Economic Evaluation of Highways Investments and Maintenance HDM Manager, Version 3.0. The World Bank (Jun 1995).
11. **Arriaga Patiño Mario C., Garnica Anguas Paul.** Índice internacional de rugosidad, aplicación en la Red Carretera de México. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 108 (1998).
12. **Arroyo Osorno José Antonio, Aguerreberre Salido Roberto.** Estado superficial y costos de operación en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 202. Querétaro, Qro (2002).
13. **Asociación Mexicana de Caminos.** Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito. Representación y Servicios de Ingeniería. México (1985).

14. **Box, Paul C. Oppenlander, Joseph C.** Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito. Traducción del Manual Traffic Engineering Studies. USA (1985).
15. **Cal y Mayor Rafael, Cárdenas G. James.** Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones. México, DF (1994).
16. **Center on Municipal Government Performance.** How Smooth are New York City's Streets? Technical Appendix 6. Fund for the City of New York (2001).
17. **Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).** Progresos de la conservación vial en América Latina. Boletín FAL 160, CEPAL, Edición No 160 (Dic 1999).
18. **Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Ibero América.** Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles, Vol 11. Chile (abr 2002).
19. **Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica.** Colección de documentos, Vol 11 (2002).
20. **Cundill, M.A.** The MERLIN Low-Cost Road Roughness Measuring Machine Transport and Road Research Laboratory. Department of Transport. United Kingdom (1991).
21. **Daniel WW.** Bioestadística. 4a. Ed. Limusa-Wiley (2002).
22. **Earl, PR, Pena-Sánchez, R.** Autocorrelation and Nonparametric Density Estimation Applied to the Mesquites (Prosopis Leguminosae) in the Lower Rio Grande Valley. Publicaciones Biológicas, FCB-UANL. Vol 6 No 1, 48-52. México (1992).
23. **Earl, PR, Pena- Sánchez, R.** Floristic Invasive Introgression: an Autoregressive Process for Hybridization applied to Mexican Prosopis spp. (Leguminosae). Publicaciones Biológicas, FCB-UANL. Vol 5, No 1, 27-31. México (1991).
24. **Federal Highway Administration.** Pavement Preservation Research Problem Statements. The Foundation for Pavement Preservation. Research Problem Statement Workshop. California (Jun 2001).
25. **Gallegos López, Rafael.** Efecto del estado superficial en la capacidad vial en carreteras multicarril Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey (1998).
26. **Gardeta Oliveros, Juan G.** Modelos de tráfico vial. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Laboratorio de Carreteras y Geotecnia José Luis Escario. Madrid, España (1985).
27. **Gillespie, TD.** Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems. National Cooperative Highway Research Program Report 228 (1980).

28. **Gillespie, TD.** Everything you always wanted to know about the iri, but were afraid to ask!The University of Michigan Transportation Research Institute. Nebraska (1992).
29. **Heidenreich Wes, Hunt Liz.** Pavement Smoothness Indices Research Brief. Oregon Department of Transportation. Salem Oregon (Ago 1998).
30. **Hewes & Oglesby.** Ingeniería de Carreteras. California, USA (1982).
31. **Highway Research Board.** Highway Capacity Manual, Special Report 87, 2nd Ed, Washington, DC (1965).
32. **Institute of Transportation Engineers.** Highway Capacity Manual Actualization 2000. National Research Council. Washington, DC (2000).
33. **Instituto Mexicano del Transporte.** Capacidad vial urbana y rural. Curso del Instituto Mexicano del Transporte. México, DF (1989).
34. **Instituto Nacional de Vías.** Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para Carreteras de dos Carriles. Ministerio de Transporte. República de Colombia (1996).
35. **Janoff, MS.** National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 308: Pavement Roughness and Rideability Field Evaluation. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC (1988).
36. **Janoff, MS, Nick, JB, Davit, PS, Hayhoe, G.F.** National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 275: Pavement Roughness and Rideability. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC (1985).
37. **Karamihas Steven M, Perera RW, Kohn SD.** Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report, Web Document 42 (Project 20-51[1]): Contractors Final Report. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. Michigan (2002).
38. **Kevin K. McGhee.** Quality Assurance of Road Roughness Measurement Final Report. Virginia Transportation Research Council (May 2000).
39. **Khaled Ksaibati, Shahriar Al Mahmood.** Utilizing the Long-term Pavement Performance Database in Evaluating the Effectiveness of Pavement Smoothness. The University of Wyoming (Mar 2002).
40. **Kittelson, Wayne .** Overview of the Year 2000 Edition of the Highway Capacity Manual, Past Chair of the user Liaison Subcommittee (Oct 2000).
41. **Larry Orcutt, Larry Galehouse, Edward Denehy, Joe Graff.** Pavement Preventive Maintenance Guidelines. Foundation for Pavement Preservation (Mar 2001).

42. **Magallanes Negrete Roberto.** Capacidad vial y niveles de servicio en carreteras de carriles múltiples. XVI Seminario de Ingeniería de Tránsito. Mazatlán, Sinaloa (1986).
43. **Maser Kenneth R, Markow Michael J.** Measuring Systems and Instrumentation for Evaluating the Effectiveness of Pavement Maintenance. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, DC (1991).
44. **McShane, William R., Roger P. Roess.** An Executive Overview, 1st Edition, Institute of Transportation Engineers. New York (1985).
45. **Mellis Manuel J.** Cálculo del IRI de una carretera a partir de su perfil longitudinal. Revista Rutas (May 1992).
46. **Myers E, RH.** Probabilidad y estadística para ingenieros. 3ª Edición Interamericana. México (1990).
47. **National Research Council.** Manual for Profile Measurement: Operational Field Guidelines. SEP P-378 (1994).
48. **Nunoo Charles.** Pavement Management Systems – Lecture, Note 5, Condition Surveys. TTE 6837 / CGN 4930 (2002).
49. **Olivera Bustamante Fernando.** Estructuración de vías terrestres. Editorial Continental. México.
50. **Peña Leal Josefina Elena.** Apuntes sobre capacidad vial. Material no publicado. Monterrey, NL (1998).
51. **Peña Leal Josefina Elena.** Traducción del “Highway Capacity Manual”. Material no publicado. Monterrey, NL (2001).
52. **Peter A Amakobe.** PSI to IRI Conversion. Pavement Monitoring Engineer (1994).
53. **Sayers Michael W, Gillespie Thomas D., Paterson William DO.** Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurement. Technical Paper 46. Banco Mundial.
54. **Sayers, MW and Karamihas, SM.** Interpretation of Road Roughness Profile Data, Final Report. Federal Highway Administration (Jun 1996).
55. **Sayers, MW, Karamihas, SM.** The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan Transportation Research Institute (1998).
56. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Estadísticas del estado de las carreteras. Dirección General de Conservación de Carreteras. México, DF (2000).

57. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Efectos de la sobrecarga en los costos de conservación de la Red Federal de Carreteras del estado de Nuevo León. Unidad General de Servicios Técnicos, Centro SCT, Nuevo León. Monterrey, NL (May 2002).
58. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Índice de rugosidad internacional. Circular Técnica No 40. México, DF (2001).
59. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Boletín 072: Se intensifica la conservación y mantenimiento de la Red Federal de Carreteras (2002).
60. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Datos viales 2001. Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos (2001).
61. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Datos viales 2002. Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos (2002).
62. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** Datos viales 2003. Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos (2003).
63. **Transportation Research Board.** Highway Capacity Manual, Special Report 209, 3rd Edition. National Research Council. Washington, DC (1985).
64. **US Department of Transportation.** Highway Performance Monitoring System Field, Manual for the Continuing Analytical and Statistical Database, Appendix J. Order M5600.1A, OMB No 2125-0028, FHWA (Dic 1987).
65. **Universidad de Cauca.** Seminario Internacional de Capacidad, Niveles de Servicio y Mejoras para Carreteras de dos Carriles. Ministerio de Obras Públicas, Universidad del Cauca. República de Colombia (Oct 1992).
66. **Vázquez Berber Román.** El concepto de capacidad vial y niveles de servicio. Instituto Mexicano del Transporte. México, DF (1990).
67. **Vázquez Berber Román.** El Manual de Capacidad Vial de 1985 (una visión ejecutiva). Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 17. Querétaro, Qro (1991).
68. **Watanatada Thawat, Harral Clell G, Paterson William D0, Dhareshwar Ashok M., Bhandari Anil, Tsunokawa Koji.** The Highway Design and Maintenance Standards Model, Vol 1, Description of the HDM-III Model. A World Bank Publication.



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx