



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

COSTOS DE OPERACIÓN BASE DE LOS VEHÍCULOS REPRESENTATIVOS DEL TRANSPORTE INTERURBANO 2006

José Antonio Arroyo Osorno
Roberto Aguerrebere Salido

**Publicación Técnica No. 283
Sanfandila, Qro, 2006**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Costos de operación base
de los vehículos representativos
del transporte interurbano
2006**

Publicación Técnica No. 279
Sanfandila, Qro, 2006

Esta edición fue elaborada por José Antonio Arroyo Osorno, investigador de la Coordinación de Integración del Transporte en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), con la asesoría y dirección del Ing Roberto Aguerrebere Salido, Coordinador de Integración del Transporte. La información sobre velocidades, consumos y rendimientos de combustible (prácticos) de algunos tractocamiones, proporcionada por la maestra Mercedes Yolanda Rafael Morales, fue muy útil para la realización de este trabajo.

El presente trabajo constituye la tercera edición actualizada de la Publicación Técnica Núm 30 del mismo título, elaborada por Roberto Aguerrebere Salido y Fernando Cepeda Narváez y publicada en 1991.

Índice

	Página
Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1
Gráficas	3
Gráficas para diferentes tipos de terreno	3
Indicadores del estado superficial	13
Nota metodológica	17
Datos utilizados	26
Camión articulado (T3-S3)	26
Camión articulado (T3-S2)	29
Camión articulado (T3-S2-R4)	32
Camión de tres ejes	35
Camión de dos ejes	38
Autobús foráneo	41
Vehículo ligero	44
Cálculo de los costos de operación base	47
Resultados	47
Camión articulado (T3-S3)	48
Camión articulado (T3-S2)	49
Camión articulado (T3-S2-R4)	50
Camión de tres ejes	51

Camión de dos ejes	52
Autobús foráneo	53
Vehículo ligero	54
Ejemplo de aplicación	57
Conclusiones y recomendaciones	61
Bibliografía	63
Apéndice A: Información técnica de los vehículos utilizados	65
Apéndice B: Velocidades, consumos y rendimientos de combustible (prácticos), de algunos tractocamiones	67
Apéndice C: Costo del flete de algunas empresas dedicadas al transporte de carga	69

Resumen

El objetivo de este documento es aportar al Sector Transporte, información y un procedimiento sencillo para la estimación de costos de operación básicos de vehículos representativos del tránsito interurbano, en función del alineamiento geométrico y del estado superficial de las carreteras.

La presente publicación toma como referencia los modelos matemáticos desarrollados por el Banco Mundial en 1987, con los cuales posteriormente estructuró un programa de cómputo denominado *Vehicle Operating Costs* (VOC, por sus siglas en inglés). Asimismo, considera la adaptación de dicho programa a las características técnicas de los vehículos que operan en México hecha en el propio IMT, denominada VOCMEX, así como los modelos con nuevas expresiones desarrolladas para el HDM-4.

A partir del uso de los modelos matemáticos mencionados, mediante el programa de cómputo VOCMEX, y de una actualización de datos diversos sobre características técnicas de los vehículos, sus precios y los de sus insumos, se conforma un conjunto de gráficas, las cuales permiten estimar los costos de operación vehicular para siete tipos de unidades, bajo condiciones diversas de alineamiento geométrico y estado superficial de las carreteras sin necesidad de usar el programa. Los datos presentados en el trabajo pueden emplearse tanto en el programa de cómputo VOC como en el HDM-4.

Abstract

This document has as a main objective to provide information on a simple procedure used to calculate vehicle operating costs for a typical vehicle used for commercial and private intercity transportation in Mexico. The procedure here described, takes into account the geometric alignment and pavement surface conditions and their effects on the vehicle operating costs.

The work here reported is based on the mathematical models developed by the World Bank and published in 1987, which gave origin to the software called Vehicle Operating Costs (VOC). Therefore, the software developed for this work (called VOCMEX) is an adaptation of the VOC. The VOCMEX considers the technical characteristics of the vehicles running on Mexican roadways as well as the models with the new mathematical expressions developed for the HDM-4 software.

From the use of the World Bank models through the VOCMEX and the data update about technical characteristics of the vehicles, their prices and their components, a set of graphics is built. These graphics allow one to estimate the operating costs of seven types of vehicles under various conditions of the geometric alignment and pavement surface without using the software. The data presented in this document can also be used in the VOC program and in the HDM-4.

Resumen ejecutivo

Este trabajo surgió como una necesidad ante la importancia de contar con herramientas actualizadas para calcular costos de operación vehicular (sus antecedentes se remiten a las Publicaciones Técnicas 20, 30 y 202 del IMT), manifiesta por la permanente recepción de solicitudes al respecto por parte de empresas de consultoría y gobiernos estatales, así como de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Se presentan datos sobre las características de la carretera (tipo de superficie; índice internacional de rugosidad; pendiente; etc), del vehículo (peso; carga útil; potencia; velocidad; área frontal proyectada; número de kilómetros conducidos por año; vida útil promedio de servicio; costos unitarios; etc), así como de los neumáticos (número de llantas por vehículo; costo de la llanta nueva; costo del renovado de la llanta; etc) para siete tipos de vehículos; y se calculan los respectivos costos de operación para condiciones ideales.

Se muestra un conjunto de gráficas acerca del efecto del deterioro de los caminos pavimentados en los costos de operación de los vehículos que, mayoritariamente, representan el tránsito en las carreteras nacionales.

Se proporcionan los factores del costo de operación base de los vehículos, que pueden ser valuados en unidades monetarias, conocidos los precios unitarios de los diferentes insumos. Con ello pueden actualizarse los valores reales expresados en las gráficas.

Las gráficas relacionan para los siete tipos de vehículos y tres tipos de terreno, la rugosidad y el índice de servicio con el costo de operación, el cual se considera como 1 en un tramo recto de pendiente 0% y pavimento nuevo (Índice Internacional de Rugosidad = 1-2 m/km; Índice de Servicio = 4.5-5), de manera que los costos correspondientes a otras condiciones de rugosidad y de alineamiento horizontal y vertical, se expresan como un factor siempre mayor que 1; de esta forma ha tratado de eliminarse la referencia a un precio variable. Con fines ilustrativos se incluyó la relación entre velocidad típica de operación y rugosidad, o índice de servicio.

Se utilizaron nuevas expresiones matemáticas para los datos referentes a la potencia máxima en operación y la potencia máxima del freno de los vehículos, derivadas de la revisión del material bibliográfico reciente del modelo HDM (The Highway Design and Maintenance Standards Model) en su versión 4, ya que éstas ofrecieron resultados más acordes con lo observado en la práctica.

Se ofrecen también los datos de salida del programa, como son: consumos por cada 1,000 veh-km; costos unitarios; y costo de operación por veh-km.

Asimismo, se desarrolla un ejemplo ilustrativo con el objeto de mostrar la influencia del costo de operación, condicionado por los alineamientos y la rugosidad, en los costos de conservación durante la vida útil de una carretera.

Se proporcionan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo, así como la bibliografía utilizada.

Finalmente, el trabajo se complementa con tres apéndices:

En el Apéndice A se presenta la información técnica de cada uno de los vehículos utilizados en este estudio.

En el Apéndice B se muestra información de campo sobre velocidades, consumos y rendimientos de combustible de algunos tractocamiones, que permiten validar los resultados intermedios obtenidos por el modelo.

En el Apéndice C se ofrece información referente al costo de fletes para algunos trayectos de empresas dedicadas al transporte de carga, la cual se utilizó para validar los resultados finales.

Introducción

La Coordinación de Integración del Transporte decidió actualizar la Publicación Técnica No 30 del IMT "Estado superficial y costos de operación en carreteras" debido a la importancia de contar con información reciente sobre el tema, y a la importante solicitud de información por parte de instituciones externas y gobiernos estatales, así como de la SCT. El proyecto tomó como referencia los modelos matemáticos desarrollados por el Banco Mundial en 1987, con los cuales posteriormente estructuró un programa de cómputo denominado Costos de Operación Vehicular (VOC) por sus siglas en inglés, mismo que se usará como herramienta principal para la actualización.

El desarrollo de la investigación se fundamenta en la adaptación de los modelos del Banco Mundial al caso de México. Se adecuaron al modelo VOC (Vehicle Operating Costs) expresiones nuevas para la potencia máxima en operación y potencia máxima al freno sugeridas en el documento: Bennett, C R and Paterson, William D O, Documentation of HDM-4, Version 1.0, International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM), United Kingdom, 2000; y se modificó el valor para el factor de eficiencia energética, aprovechando el rango sugerido en: Watanatada, T, Dhadeshwar, A M and Rezende Lima, P R, Vehicle Speeds and Operating Costs, Models for Road Planning and Management, The World Bank, 1987. El resto de los datos fueron actualizados al año 2006.

Es importante recordar que el Estudio de Normas para el Diseño y Mantenimiento de Carreteras se desarrolló bajo el auspicio del Banco Mundial; en él participaron instituciones académicas y dependencias involucradas en la planeación, construcción y operación de carreteras en diversos países. Las relaciones entre costos de operación y características de carreteras, incluida la rugosidad, fueron estudiadas en Kenia (1971-75); Brasil (1975-84); Santa Lucía (1977-82); e India (1977-83).

Revisando los estudios de los cuatro países mencionados, se concluyó que los de Brasil presentaron no sólo mayor cobertura y semejanza en cuanto a tipos de vehículos y características de caminos, sino también mayor similitud económica con relación a las condiciones prevalecientes en México durante el periodo de estudio. Por lo anterior, se decidió utilizar su metodología e información pertinente para aplicarla con datos nacionales, mediante el programa de cómputo basado en los propios estudios de Brasil, como herramienta principal para la adaptación.

La adecuación consistió en el uso de datos sobre características técnicas de vehículos nacionales, así como costos unitarios de sus insumos. También se definieron, con base en análisis de sensibilidad en rangos de factibilidad y auscultaciones de campo, datos necesarios relativos a la utilización de los vehículos.

Gráficas

Gráficas para diferentes tipos de terreno

Se presentan dos gráficas para cada uno de los siete vehículos seleccionados: dos camiones articulados con semirremolque; un camión articulado con semirremolque y remolque; un camión pesado de tres ejes; un camión mediano de dos ejes; un autobús foráneo; y un vehículo ligero.

Las gráficas del primer tipo, muestran en la parte superior de las figuras, la relación entre el estado de la superficie de rodamiento, en términos del Índice de Servicio y el Índice Internacional de Rugosidad, y el costo de operación del vehículo como un factor de su costo de operación base, para tres tipos de terreno; sensiblemente plano (ligeras pendientes y curvas suaves); de lomerío; y montañoso. Se incluye como referencia el caso base, correspondiente a un camino recto y plano, con pavimento nuevo.

Las gráficas del segundo tipo relacionan para los tres tipos de terreno mencionados, el estado de la superficie de rodamiento en términos del Índice de Servicio y del Índice Internacional de Rugosidad, con la velocidad de operación típica (correspondiente a una velocidad 'de crucero' sobre un camino de un sólo carril en cada sentido, sin acotamientos).

Debido a la poca influencia de rugosidades por debajo de un Índice Internacional de Rugosidad de 2m/km (o por arriba de un Índice de Servicio de 4.3), tanto en los costos como en las velocidades, dicho rango no se incluyó en las gráficas.

En ambas gráficas las pendientes y curvaturas horizontales que corresponden a cada tipo de terreno son de 1% y 100°/km respectivamente, para el caso plano; de 3% y de 300°/km, para terreno de lomerío; y de 5% y 700°/km, para terreno montañoso. Al caso base le corresponden pendientes y curvaturas nulas.

El concepto de curvatura manejado corresponde a una curvatura media en un tramo representativo, que se calcula como la suma de los ángulos de deflexión en valor absoluto (o ángulos centrales de las curvas) dividida entre la longitud del tramo, y se expresa en grados por kilómetro. La fig 1 muestra el plano horizontal de tres tramos considerados homogéneos con sus respectivas características geométricas, para diferentes niveles de curvatura media acumulada.

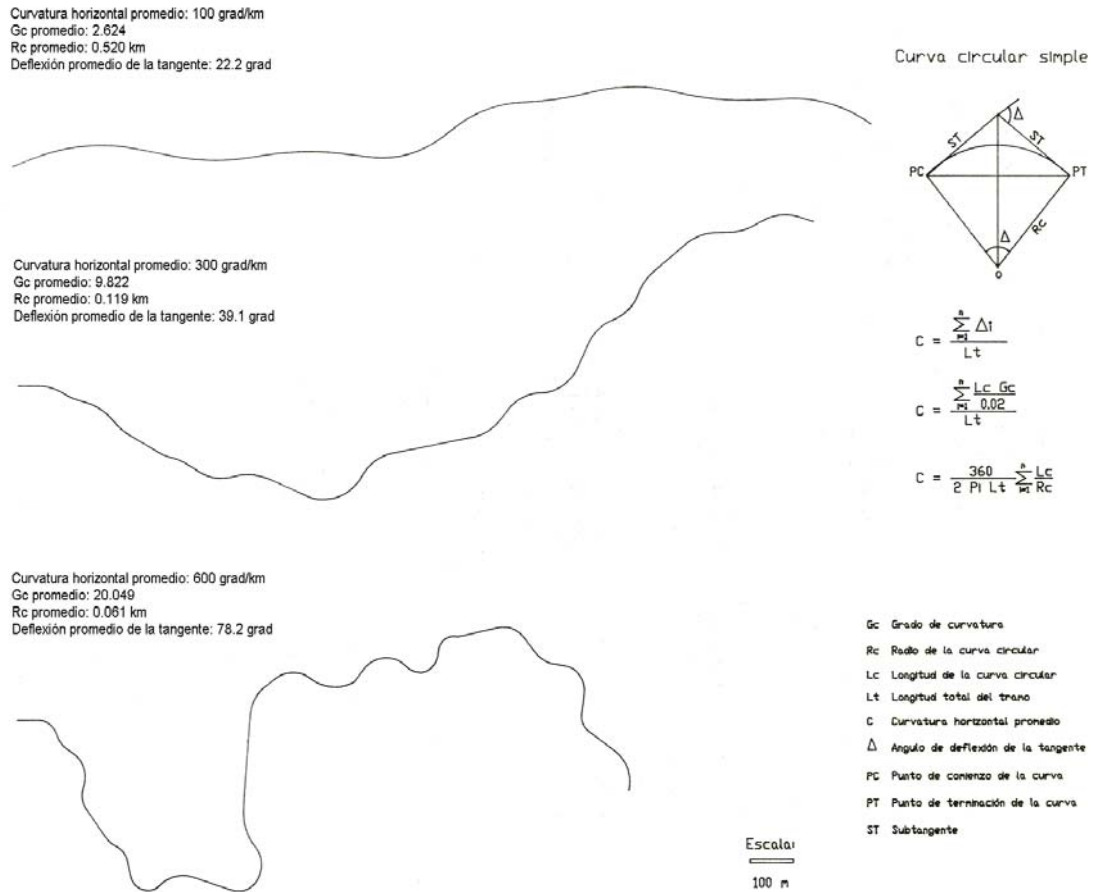
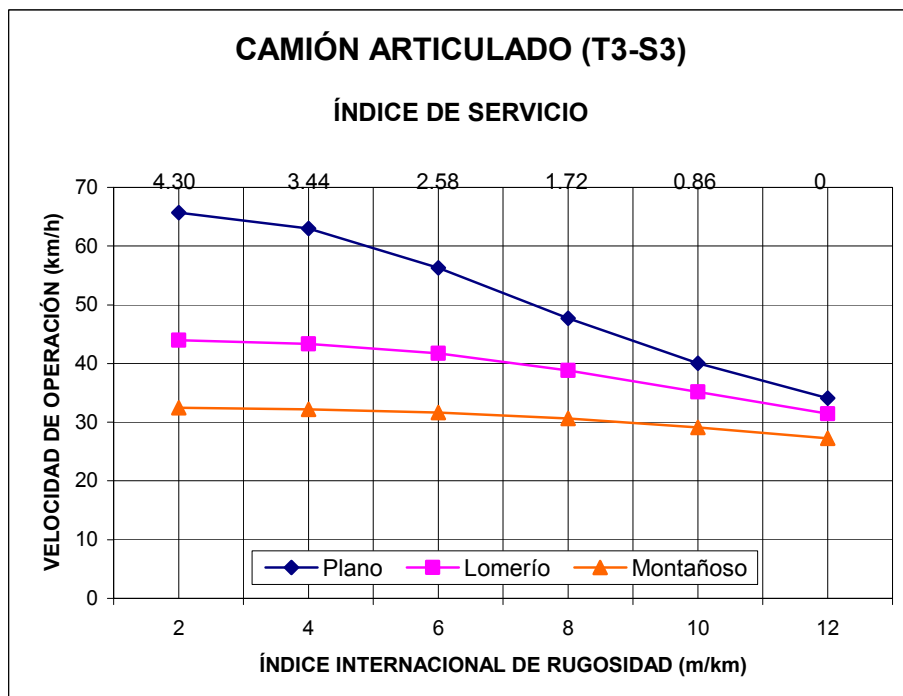
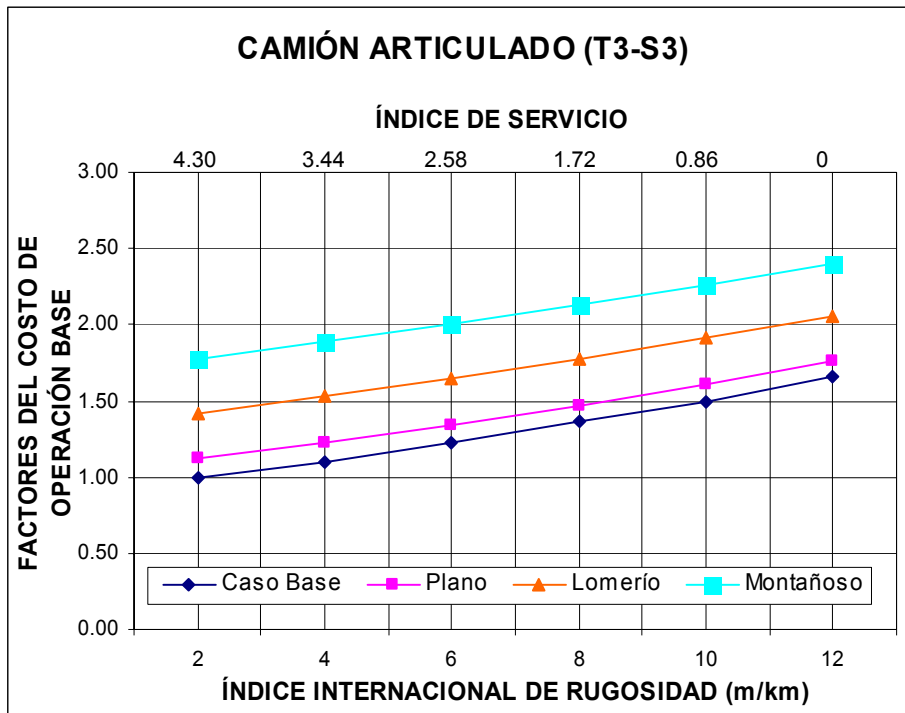
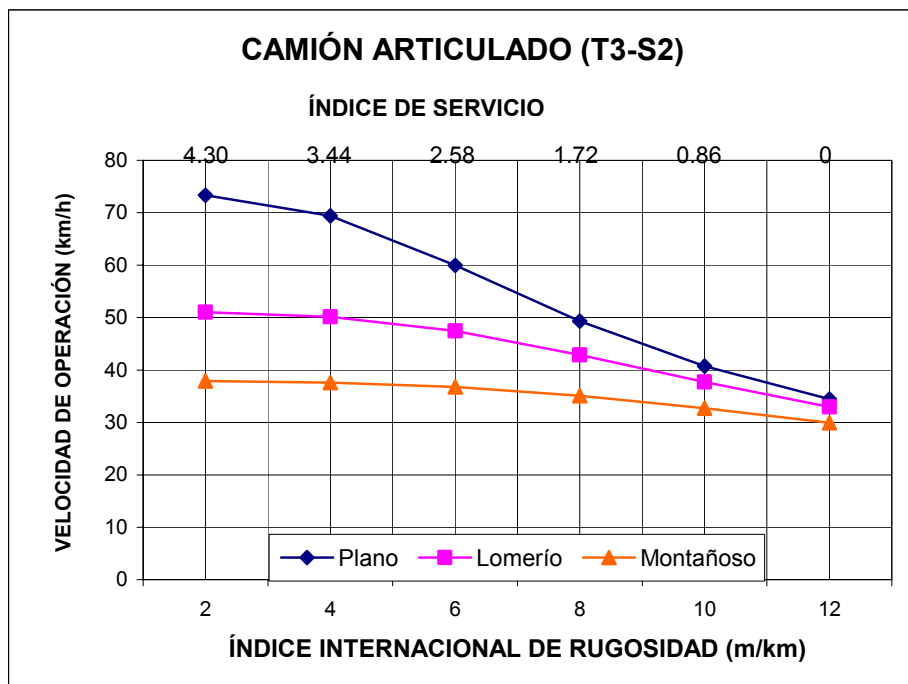
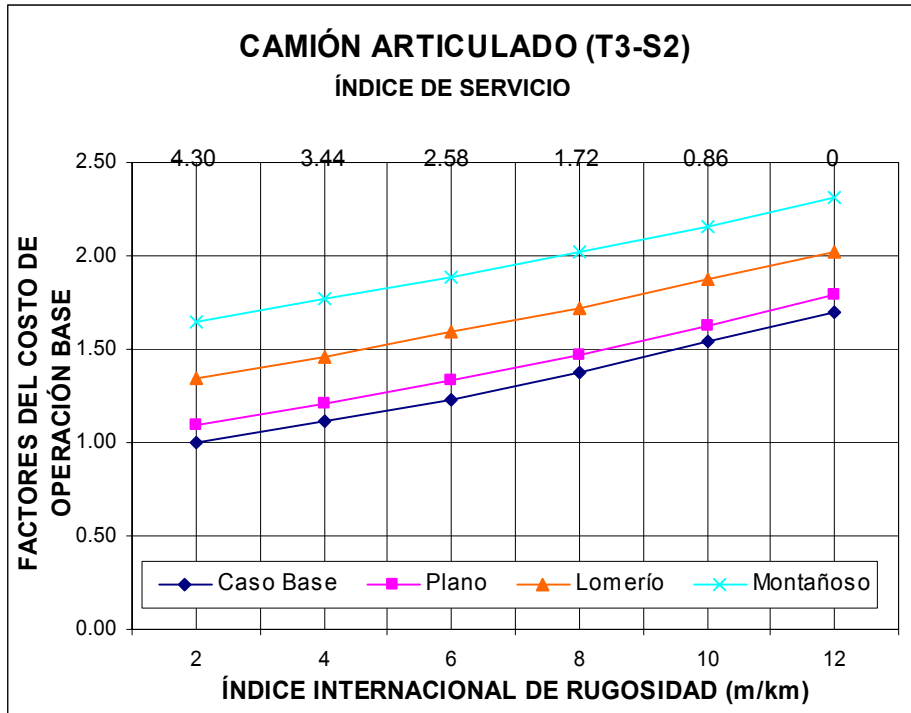
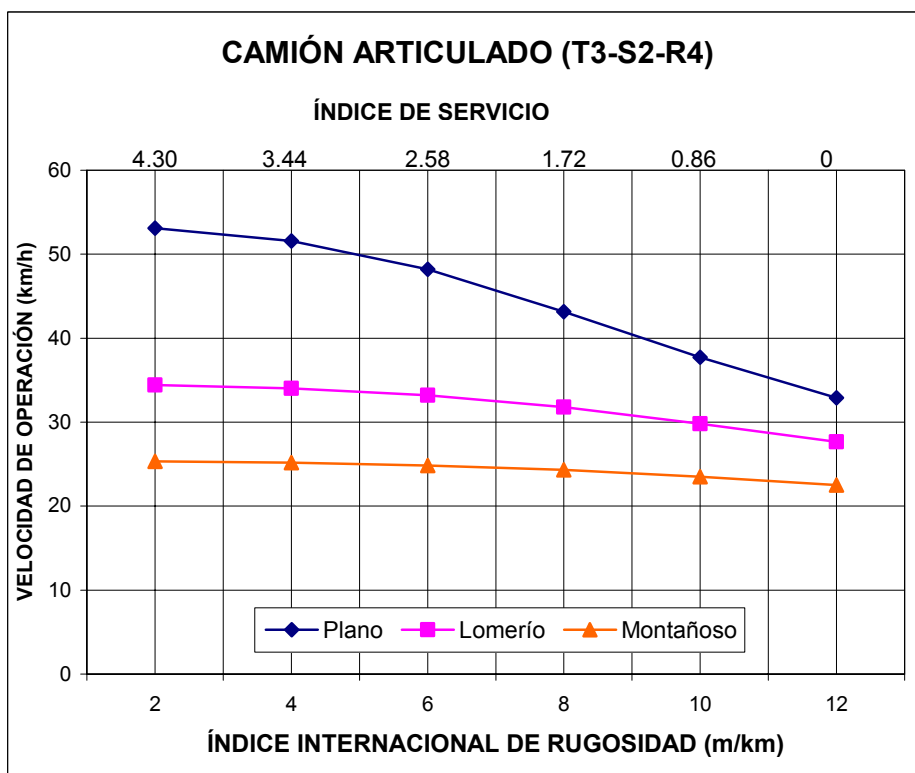
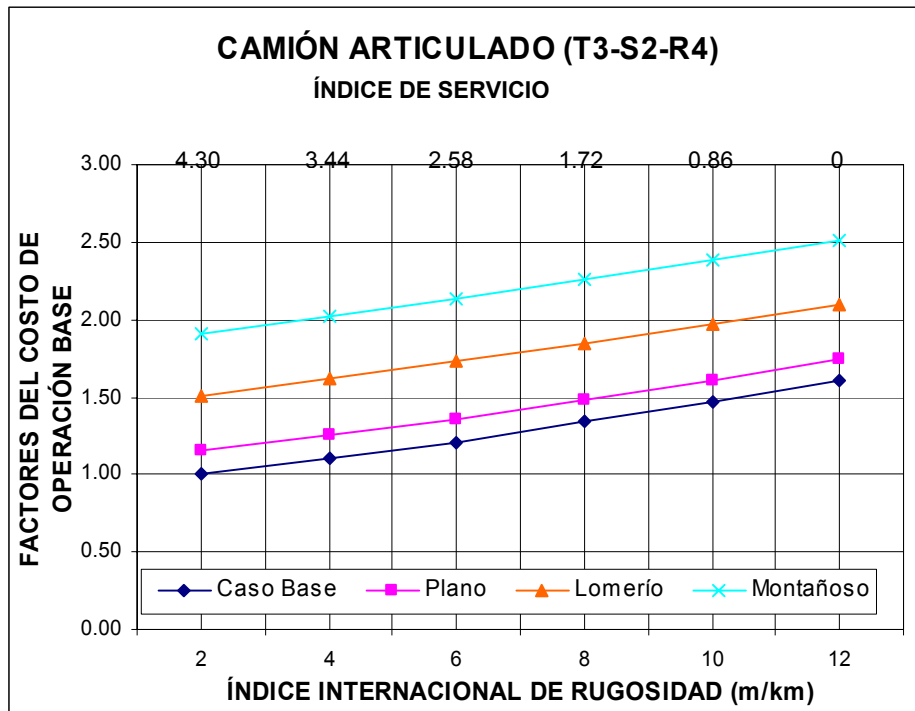
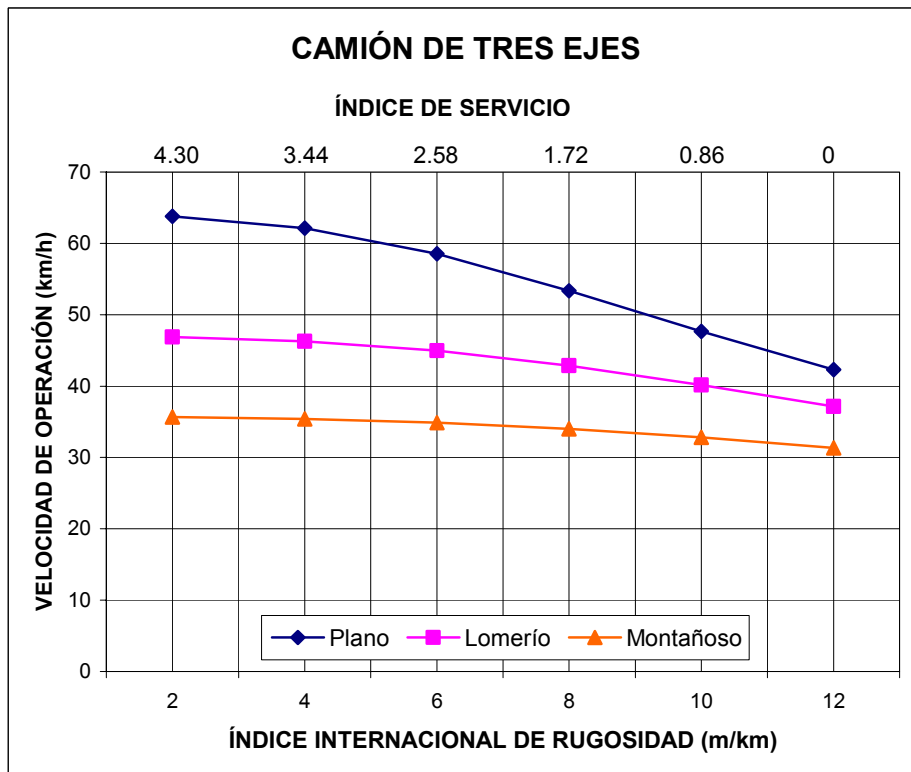
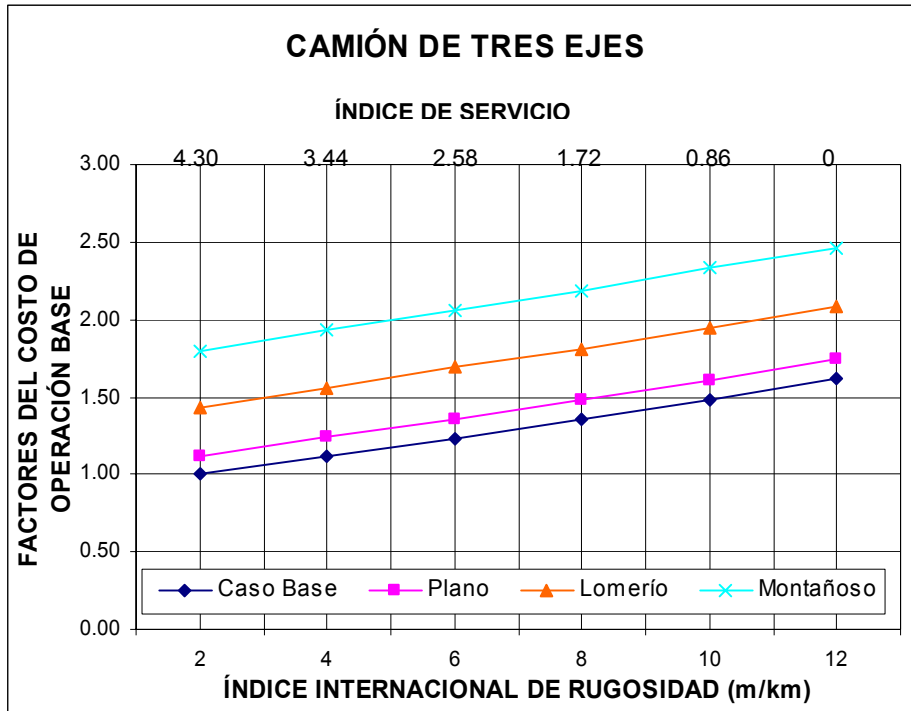


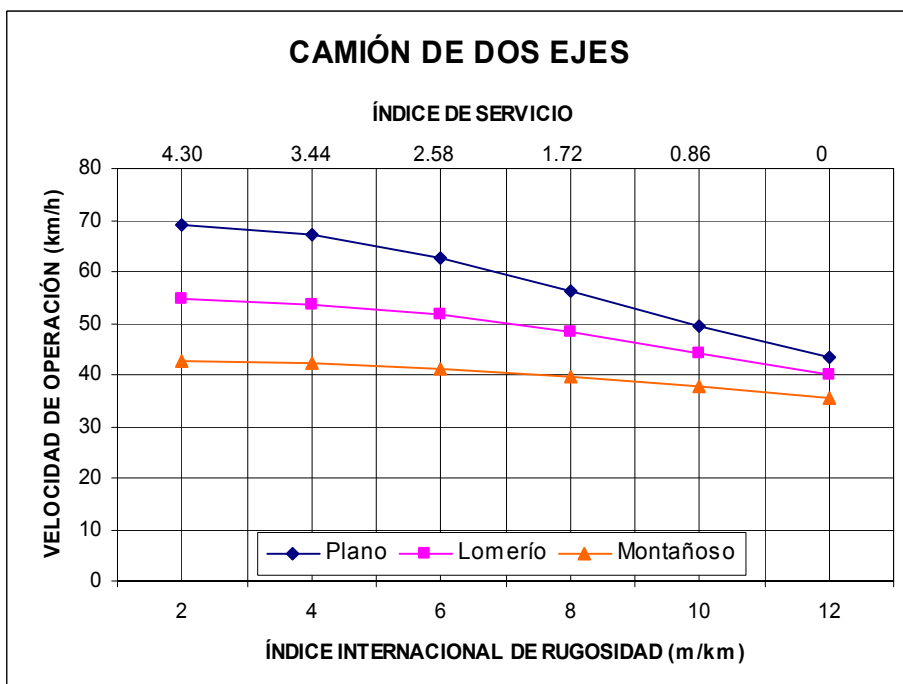
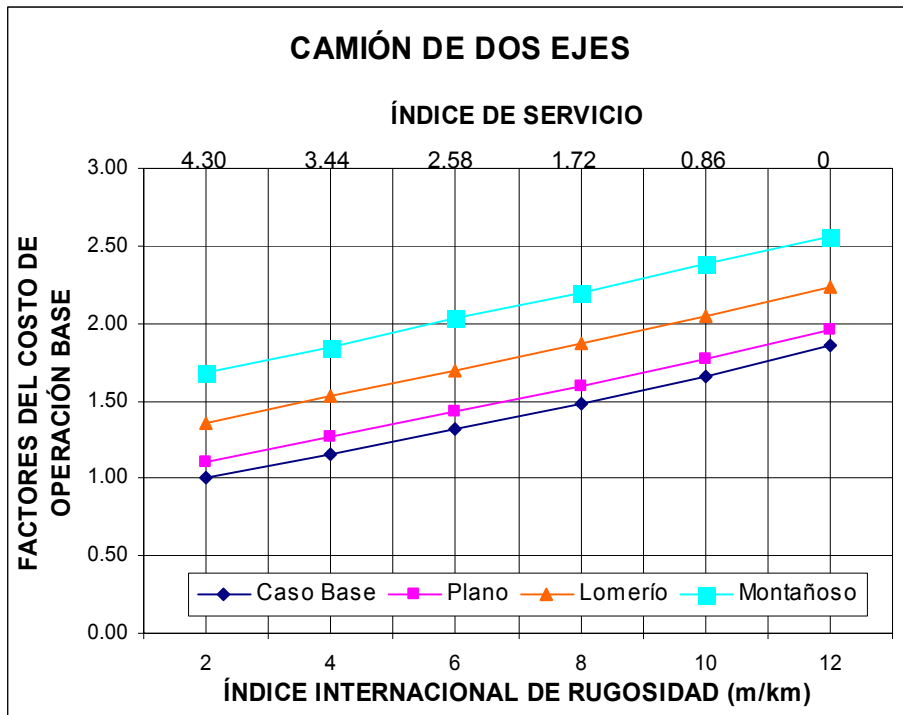
Fig 1
 ASPECTO DE TRES TRAMOS HOMÓGENOS CON DIFERENTES NIVELES
 DE CURVATURA ACUMULADA

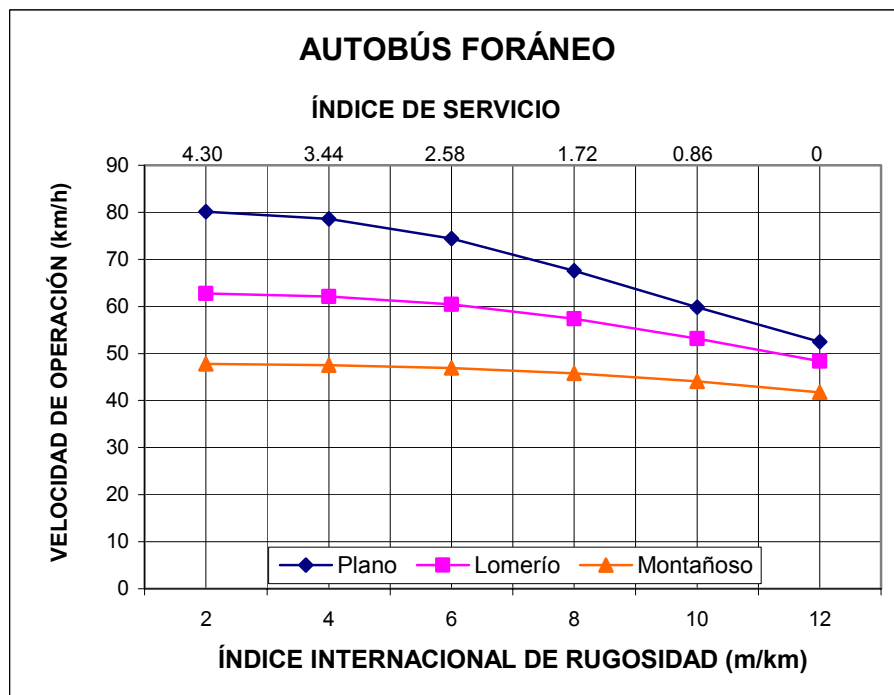
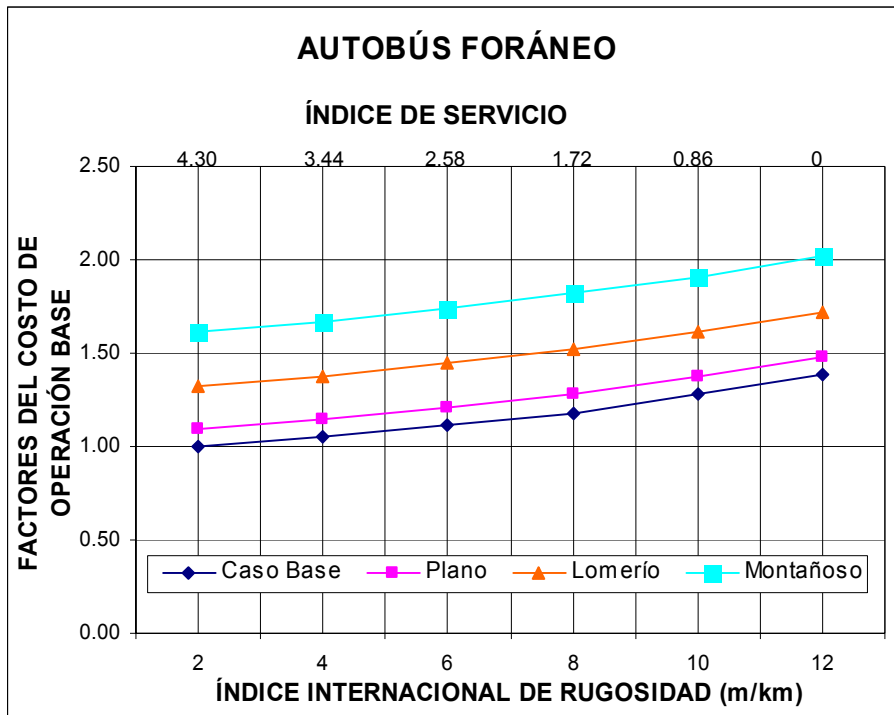


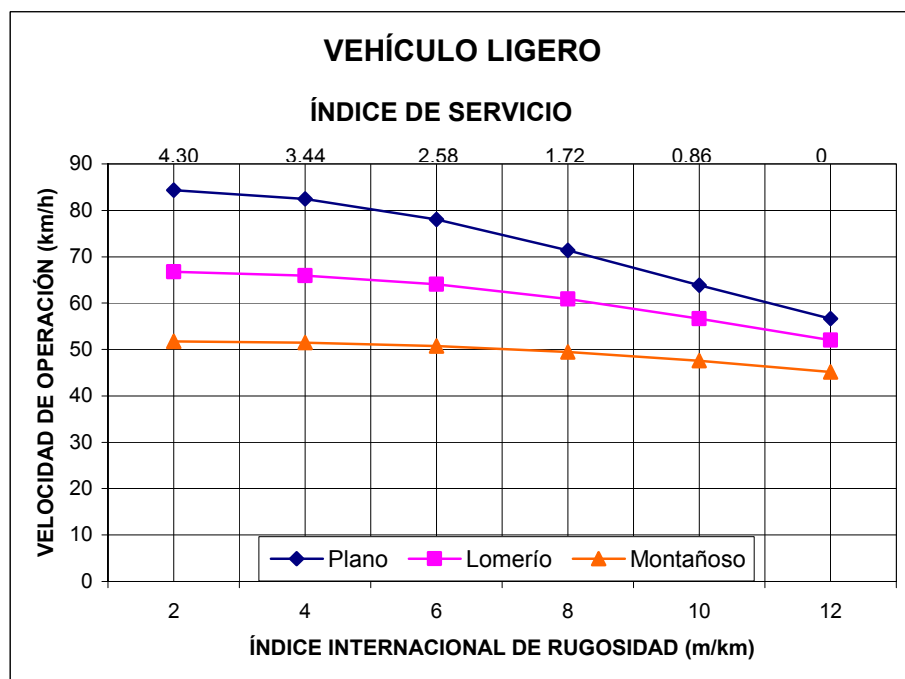
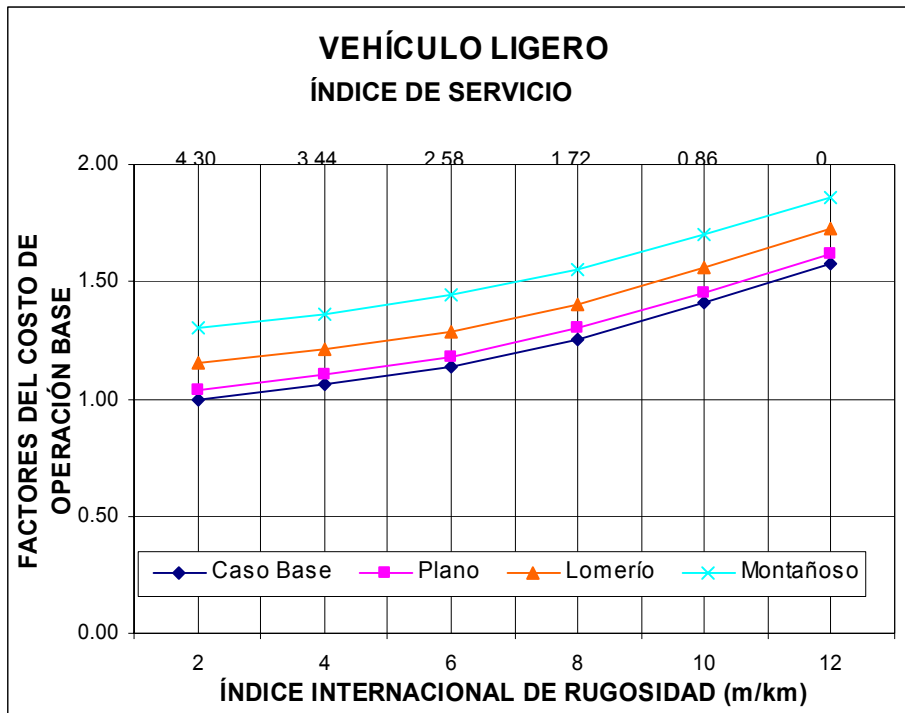












Indicadores del estado superficial

Los estados de la superficie de rodamiento están representados, como fue mencionado, por el Índice de Servicio y el Índice Internacional de Rugosidad (IIR). El primero corresponde a la valuación de la comodidad del viaje en una escala de 0 a 5, que realizan cuatro personas en un vehículo en buenas condiciones de suspensión y alineación, circulando a velocidad normal de operación (*).

El Índice Internacional constituye una medida de la rugosidad, entendida como las deformaciones verticales de la superficie de un camino con respecto a la superficie plana, mismas que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de viaje, las cargas dinámicas, y el drenaje superficial del camino. La rugosidad es, por tanto, una característica del perfil longitudinal de la superficie recorrida; y el Índice Internacional de Rugosidad puede definirse como la suma de las irregularidades verticales (en valor absoluto) a lo largo de la zona de rodadura de un tramo homogéneo de carretera, entre la longitud del mismo; su unidad de medida es m/km.

En la fig 2 se muestra la escala de dicho índice con una breve descripción del estado cualitativo del pavimento correspondiente a ciertos rangos.

En virtud de que los equipos disponibles para la medición de la rugosidad son muy variados y generan resultados con base en escalas propias, se incluyen las equivalencias aproximadas entre las principales escalas de rugosidad utilizadas internacionalmente (fig 3). Por último, cabe mencionar que además del equipo móvil, generalmente caro, existe un método muy accesible para realizar estimaciones de la rugosidad en campo, a través del mismo procedimiento empleado para controlar las tolerancias a las irregularidades de una superficie (Paterson, 1987). El método consiste en colocar manualmente una regla de 2m o 3m de largo, longitudinalmente, sobre una de las huellas de camino; medir la desviación máxima bajo la regla, en mm; y repetir la operación a distancias convenientemente espaciadas. Con los datos de las mediciones, calcular las frecuencias acumuladas, y sustituir el valor del 95 percentil resultante (aquel que es mayor al 95% de las observaciones e inferior al 5%) en la fórmula siguiente que corresponda, para conocer el valor del IIR, en m/km:

* El procedimiento detallado y recomendaciones asociadas pueden consultarse en "SISTEMA MEXICANO PARA LA ADMINISTRACION DE PAVIMENTOS. Primera fase". Documentos Técnicos No. 3 Y 4. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, Qro., México, 1991.

$IIR(m/km) = 0.35 DMR_3$; $DMR_3=95$ percentil de las desviaciones máximas, bajo una regla de 3m de largo

$IIR (m/km) = 0.437 DMR_2$; $DMR_2 = 95$ percentil de las desviaciones máximas, bajo una regla de 2m de largo

Un procedimiento alternativo a la aplicación de estas fórmulas es el uso de las gráficas de la fig 4.

Para reducir errores en la medición de la rugosidad y, por tanto, en la apreciación de costos de operación mediante las gráficas aquí presentadas, se recomienda medir o evaluar tramos homogéneos. Con ello se disminuirán las distorsiones que causaría el uso de grandes promedios de índices de servicio o rugosidad como datos de entrada a las gráficas.

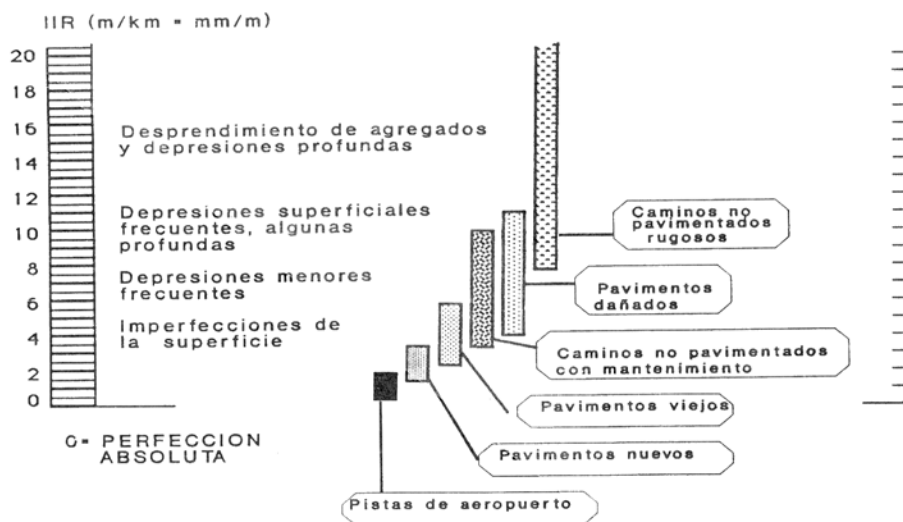
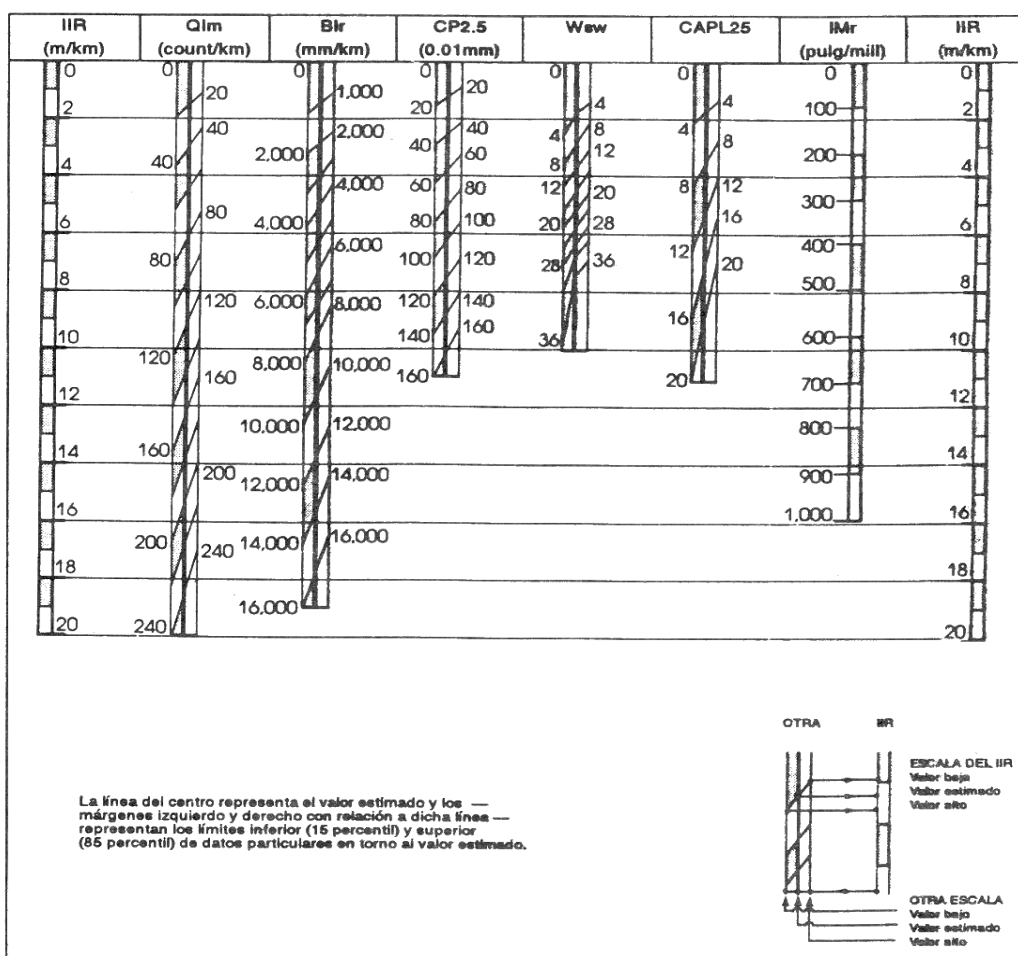


Fig 2
ESCALA DEL ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD

Fuente: Adaptado de Sayers, M W, T D Gillespie and W D O Paterson (1986)
Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. Technical Paper 46. The World Bank. Washington, D C



NOTAS: Conversiones estimadas sobre datos de "International Road Roughness Experiment" (Sayers, Gillespie and Queiroz, 1986)
 IIR Índice Internacional de Rugosidad (Sayers, Gillespie and Paterson, Public Tec del Banco Mundial No 46, 1986)
 QIm "Quarter-car Index" de un "Maysmeter" calibrado, Estudio de Costos en Carreteras, Brasil-PNUD:

$$IIR = QIm / 13 + 0.37 IIR; \quad IIR < 17$$

Bir "Bump integrator trailer" a 32 km/h, "Transport and Road Research Laboratory", Inglaterra:

$$IIR = 0.0032 Bir^{0.98} + 0.31 IIR; \quad IIR < 17$$

CP2.5 "Coefficient of planarity" sobre una base de 2.5 m de longitud para un perfilómetro APL72, "Centre de Recherches Routiers", Bélgica:

$$IIR = CP2.5 / 16 + 0.27 IIR; \quad IIR < 11$$

Wsw, Energía de Onda Corta, para un perfilómetro APL72, "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées", Francia:

$$IIR = 0.78 Wsw^{0.63} + 0.89 IIR; \quad IIR < 9$$

CAPL25 Coeficiente del perfilómetro APL25, "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées", Francia:

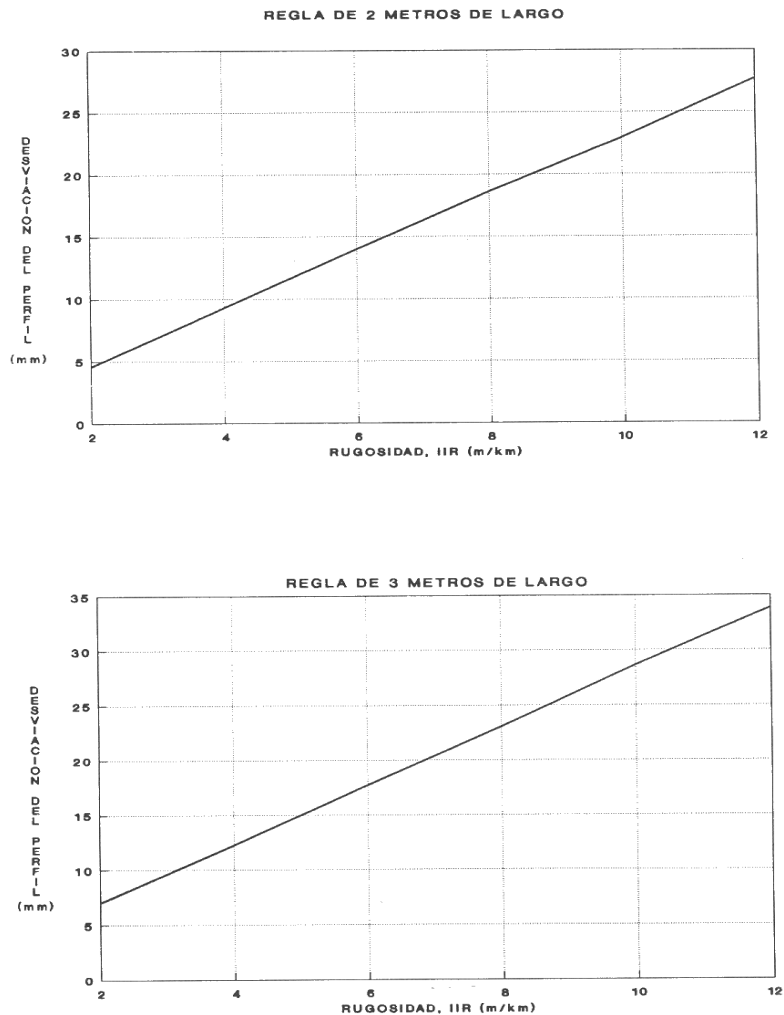
$$IIR = 0.45k CAPL25 + 16%; \quad IIR < 11$$

Dónde k=1 para uso general, k=0.74 para superficies de concreto asfáltico; k=1.11 para tratamiento superficial, con tierra o grava
 IMr, Equivalencia del IIR en pulg/milla, de la Simulación de Referencia de un "Quarter-car" a 50 mill/h (ver "HSR-reference" en Gillespie, Sayers and Segel, NCHRP report 228, 1980) y "RARS 80" en Sayers, Gillespie y Queiroz, Public Tec del Banco Mundial No 45, 1986):

$$IIR = IMr / 63.36$$

Fuente: Adaptación de Paterson, W D O (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects, Models for Planning and Management", The Highway Design and Maintenance Standards Series, pág.36. The World Bank

Fig 3
 CONVERSIONES APROXIMADAS ENTRE LAS PRINCIPALES ESCALAS DE RUGOSIDAD



NOTA: Las desviaciones del perfil corresponden al valor del 95 percentil de las mediciones, bajo la regla correspondiente

Fuente: Adaptación de Paterson, W D O (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects, Models for Planning and Management", The Highway Design and Maintenance Standards Series, pág. 40, The World Bank

Fig 4
EQUIVALENCIAS ENTRE LA ESCALA DEL ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD Y DESVIACIONES CON RESPECTO A REGLAS DE 2m y 3m DE LONGITUD

Nota metodológica

El desarrollo del trabajo tuvo como antecedente las Publicaciones Técnicas 20, 30 y 202 elaboradas en el propio Instituto Mexicano del Transporte. Tomándolas como base, se trabajó para obtener costos de operación vehicular actualizados de los vehículos más representativos que transitan por las carreteras nacionales y que puedan ser de utilidad a los responsables de la construcción y conservación de carreteras, y a los especialistas en su planeación.

La actualización de la información consistió en obtener características técnicas de los siete tipos de vehículos identificados que intervienen para determinar los costos de operación vehicular, y que son: peso del vehículo vacío; carga útil; velocidad deseada; área frontal proyectada; y velocidad calibrada del motor. El factor de eficiencia energética se modificó, aprovechando el rango permitido por el modelo HDM (The Highway Design and Maintenance Standards Model) en su versión 3, debido a que arrojó resultados más cercanos a la realidad. La potencia máxima en operación y la potencia máxima del freno, se calcularon tomando como referencia las expresiones matemáticas sugeridas en el modelo HDM (The Highway Design and Maintenance Standards Model) en su versión 4, ya que éstas ofrecieron resultados más acordes con lo observado en la práctica, como sigue:

$HPDRIVE=0.75 HPRATED$, para vehículos diesel (Bennet, 1994)

$HPDRIVE= 2.0 HPRATED^{0.7}$, para vehículos de gasolina (Watanatada, 1987)

$HPBRAKE=9.3 GVW + 13$, (HDM-4), para ambos tipos de vehículos

Dónde:

HPDRIVE: potencia máxima en operación

HPBRAKE: potencia máxima del freno

HPRATED: potencia nominal del vehículo

GVW: peso neto del vehículo, en toneladas

Considerando:

HPRATED tiene que dividirse entre 0.98632 para convertirla en HP métricos (1 HP métrico = 0.98632 HP).

La expresión de HPBRAKE, por su parte, se divide entre 0.736 para hacer la conversión de KW a HP métricos (1 HP métrico = 736 W = 0.736 KW).

Se investigaron características de los neumáticos, tales como: precio de llantas nuevas y costo del renovado. También, se obtuvieron datos sobre la utilización del vehículo como son el número de kilómetros y horas conducidos por año; vida útil promedio de servicio; edad del vehículo en kilómetros; número de pasajeros por

vehículo (para el caso del autobús foráneo), y costos unitarios como el precio del vehículo nuevo; costo del combustible y de los lubricantes; tiempo de los operadores; mano de obra de mantenimiento; tasa de interés anual; y costos indirectos por veh-km.

A partir de éstos y de otros datos y coeficientes originales de los modelos, cuyo listado se presenta para cada vehículo en este capítulo, se calcularon velocidades y costos de operación para rugosidades de 2 a 12 m/km, y combinaciones de pendientes y curvaturas horizontales representativas de un trazo totalmente plano y recto (0% y 0°/km, respectivamente), de otro en terreno sensiblemente plano (1% y 100°/km), en lomerío (3% y 300°/km), y en terreno montañoso (5% y 700°/km).

En las tablas A.1 y A.2 se presentan estos resultados intermedios para cada uno de los vehículos seleccionados.

Los costos se dividieron entre el costo de operación base, para obtener factores adimensionales como los que se muestran en las tablas A.3 para todos los vehículos.

Los resultados se graficaron en la forma en que se presentan en el apartado correspondiente, incluyendo en el eje horizontal superior la equivalencia de rugosidad en términos del Índice de Servicio, establecida con base en la experiencia nacional. Debido a la prácticamente nula variación de costos y velocidades por debajo de un Índice Internacional de Rugosidad de 2 m/km (o por arriba de un Índice de Servicio de 4.3), dicho rango no se incluyó en las gráficas.

TABLA A.1
VELOCIDAD DE OPERACIÓN-CAMIÓN ARTICULADO (T3-S3)
Valores calculados en km/h (2006)

IIR	Plano	Lomerío	Montañoso
2	65.71	44.00	32.45
4	63.01	43.36	32.21
6	56.28	41.72	31.68
8	47.69	38.80	30.66
10	40.06	35.14	29.11
12	34.09	31.42	27.22

Columnas: diferentes tipos de terreno
Renglones: Índice Internacional de Rugosidad, en m/km

TABLA A.2
COSTOS DE OPERACIÓN-CAMIÓN ARTICULADO (T3-S3)
Valores calculados en pesos por veh-km (2006)

IIR	Caso base	Plano	Lomerío	Montañoso
2	10.11	11.29	14.33	17.88
4	11.20	12.41	15.49	19.07
6	12.36	13.59	16.69	20.28
8	13.72	14.89	17.95	21.53
10	15.20	16.32	19.30	22.85
12	16.75	17.82	20.72	24.24

Columnas: diferentes tipos de terreno
Renglones: Índice Internacional de Rugosidad, en m/km

TABLA A.3
FACTORES DEL COSTO BASE-CAMIÓN ARTICULADO (T3-S3)
(adimensional)

IIR	Caso base	Plano	Lomerío	Montañoso
2	1.00	1.12	1.42	1.77
4	1.10	1.23	1.53	1.89
6	1.22	1.34	1.65	2.01
8	1.36	1.47	1.78	2.13
10	1.50	1.61	1.91	2.26
12	1.66	1.76	2.05	2.40

Columnas: diferentes tipos de terreno
Renglones: Índice Internacional de Rugosidad, en m/km

