

DESEARROLLO DE UNA NUEVA METODOLOGIA  
PARA LA ESTIMACION DE COSTOS DE OPERACION  
DE VEHICULOS EN CARRETERAS PARA CHILE (1)

Sergio González T., Walter Brüning M., Kenji Kodama M.,  
Celeste Chiang A., Enrique Runin Z. y Felipe Manríquez O.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile  
Casilla 228/3, Santiago, Chile.

RESUMEN

El presente documento se refiere a los principales resultados de un proyecto de investigación cuyo objetivo fue construir un nuevo conjunto de relaciones destinadas a la estimación de costos de operación de vehículos en caminos para Chile.

Después de un análisis de metodologías alternativas disponibles, se decidió apoyar el estudio en las relaciones obtenidas de aquel desarrollado en Brasil (HDM III), sujeto a una calibración y adaptación de los parámetros a la situación nacional. A partir de encuestas directas en caminos se decidió la estratificación del parque vehicular en nueve categorías de vehículos, para cada una de las cuales se derivan expresiones apropiadas para la estimación de velocidades en condiciones de flujo libre, consumos de combustible, repuestos, mano de obra en mantenimiento, neumáticos, lubricantes y depreciación. Se presenta la metodología utilizada en cada caso, los resultados obtenidos, un análisis del impacto sobre la evaluación de proyectos viales y las principales conclusiones del estudio.

---

1) Esta investigación contó con el financiamiento de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

## 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

La función principal de las relaciones de costos de operación de vehículos es apoyar el proceso de toma de decisiones en inversión y gestión vial. Cabe mencionar que la estimación de costos a usuarios constituye una de las componentes de mayor relevancia (entre 60 y 80%) del costo total del ciclo de vida de un camino -inversión, conservación y operación- (Watanatada et al, 1985), por lo tanto, es de gran importancia para el desarrollo de planes integrales en la administración de caminos a un nivel nacional.

La estimación de costos de operación de vehículos, actualmente basada en la Guía para Evaluar Proyectos Viales de la Dirección de Vialidad (MOP, 1982), ha sido sometida a juicios críticos producto de variaciones detectadas en las relaciones que de allí emanan con las observadas en la práctica. Igualmente, es posible detectar otras inconsistencias en el proceso de determinación de costos de operación de vehículos, relacionadas con la estimación del vector de precios y con los procedimientos utilizados en la obtención de las variables geométricas y físicas del tramo vial en estudio. Por último, es destacable como antecedente para el planteamiento de esta investigación, la aparición del HDM III (Watanatada et al, 1985) como una nueva metodología para estimar costos de operación, surgida como resultado de nueve años de investigación de un grupo multidisciplinario en Brasil con financiamiento del Banco Mundial.

Los objetivos centrales del estudio aquí reportado fueron:

- i) Determinar el mejor conjunto de relaciones para estimar costos de operación de vehículos en carreteras, orientado a la toma de decisiones en materia de inversión y gestión vial, bajo condiciones de flujo libre.
- ii) Plantear una metodología de determinación del vector de precios de los ítems que componen los costos de operación de vehículos, que permita uniformar criterios en el país.
- iii) Proponer métodos de actualización de las relaciones de costos de operación y vector de precios que permitan mantenerlos vigentes a nivel nacional.
- iv) Entregar un programa computacional y manuales de uso que aseguren la uniformidad de resultados y formato para este proceso.

## 2. METODOLOGIA GENERAL

### 2.1 Revisión Bibliográfica.

Como resultado de una exhaustiva revisión bibliográfica, que incluyó entre otros a; De Weille (1966), Claffey (1971), Hide et al.(1971,1975), Morosiuk (1982), MOP (1982) y Watanatada et al.(1985), detallada extensamente en el estudio "Validación y Complementación de Costos Operacionales en Caminos Nacionales", abreviado (COPER) (Departamento de Ing.Civil U.de Chile, 1989), se concluyó sobre la conveniencia de apoyarse en el estudio HDM III como metodología fuente.

Su ventaja principal radica en la incorporación de conceptos de física y mecánica del comportamiento de los vehículos y del consumo de recursos involucrados, a diferencia de simples modelos estadísticos agregados que constituyeron la base de los principales estudios hasta el HDM II (The World Bank, 1980). Este último método tiene una fuerte dependencia de condiciones locales, en términos de la tipología de vehículos, caminos y características conductuales.

El desarrollo del HDM III permite, por lo tanto, aumentar la generalidad de su utilización, disminuyendo la dependencia hacia el lugar geográfico donde fue calibrado inicialmente. Otras razones, como el rango muestral más amplio que estudios anteriores, el cúmulo de experiencia técnica en el análisis y procesamiento, así como la disponibilidad de metodologías explícitas, desarrolladas por los mismos autores, para su adaptación a diferentes realidades locales, hicieron claridad para esta selección.

### 2.2 Aspectos Generales.

Los ítems que se decidió incluir en el análisis de las funciones de costos son: tiempo (velocidad), combustible, repuestos, mano de obra en mantención, neumáticos, lubricantes y depreciación. Se excluyó el ítem interés, dado que su dependencia es más clara con el tiempo de posesión del vehículo que con decisiones sobre infraestructura vial o uso del vehículo.

Una vez decidido los ítems a estimar y la formulación analítica del modelo a utilizar, se procedió a la etapa de recolección y procesamiento de datos. Para ello cabe distinguir diferentes tipos de situaciones y parámetros de cada modelo. Algunos plantean una dependencia absoluta hacia condiciones locales (vector de precios, peso total del vehículo), otros en que parece recomendable utilizar valores locales permanentes (parámetros de consumo), y también, valores locales que dependen de cada proyecto en estudio (características geométricas).

La primera fase de la recolección de datos se orientó a la definición de las categorías de vehículos, hacia las cuales se dirige posteriormente la estimación de parámetros locales y validación de resultados de estimación de costos frente a datos obtenidos de fuentes nacionales. Dicha categorización se dirigió, por una parte, a incrementar los niveles de confiabilidad actuales, aumentando el número de categorías y, por otra, a mantener las actuales categorías, ya sea con fines comparativos o para estudios simplificados.

La información base estuvo constituida por 14031 vehículos registrados en 16 puntos de control en diferentes caminos nacionales, desagregados en 8655, 3833 y 1743 vehículos livianos, de carga y de transporte público, respectivamente. Con estos datos se definió 9 categorías de vehículos, determinadas según características físicas, técnicas y de utilización. Ellas son: automóviles menores a 800 cc (A1), automóviles entre 800 y 1799 cc (A2), automóviles sobre 1800 cc (A3), camionetas y jeeps (CJ), camiones simples con capacidad de carga inferior y superior a 6 Ton (CL) y (CM), respectivamente, camiones articulados (CA), buses interurbanos (BI) y buses rurales (BR).

A partir de la misma información se definió las marcas-modelos representativas para cada categoría, así como la distribución de la edad del parque y kilometraje de recorrido acumulado.

Una vez recogida la información necesaria para la estimación de los parámetros nacionales, más la información de consumos o costos en cada ítem, se procedió a validar los resultados, con diferentes conclusiones metodológicas según cada caso, los cuales se expresan en los puntos siguientes. La validación final de todo el proceso se realizó analizando el impacto de la nueva metodología propuesta en la determinación de los beneficios y rentabilidad de diferentes proyectos viales tipo.

### 3. CONSTRUCCION DE FUNCIONES DE CONSUMO DE RECURSOS

Se presenta en los puntos siguientes un resumen del proceso seguido para la adopción y calibración de funciones de consumo de los diferentes recursos involucrados en los costos de operación de vehículos, incluyéndose en detalle la formulación analítica y valores de los parámetros recomendados para aplicar en Chile.

#### 3.1 Determinación de Velocidades en Flujo Libre.

La velocidad de los vehículos en carreteras corresponde a un parámetro intrínsecamente variable. Junto a las

características propias de cada vehículo, del tramo vial en observación, del conductor, del medio ambiente (clima, actividad lateral, etc.), de la señalización, de restricciones legales y otras, se agregan las características del flujo vehicular según sentido de tránsito (efecto congestión). En esta etapa, el estudio se dirigió hacia la estimación de velocidades en condiciones de flujo libre para los 9 tipos de vehículos previamente categorizados.

El HDM III, a diferencia de los modelos disponibles, desarrolla modelos de predicción basados en teorías probabilísticas de restricciones físicas que limitan la velocidad, e incorpora el concepto de velocidad deseada, en contraste con la simple correlación estadística utilizada en los anteriores modelos. Básicamente, el modelo está deducido a partir de relaciones físicas (ecas.de equilibrio de fuerzas) entre los diferentes mecanismos que gobiernan la velocidad de flujo libre de un vehículo, a medida que se desplaza por una sección de ruta de características dadas. Este hecho permite que las relaciones sean aplicables en múltiples circunstancias, a diferencia de las antiguas relaciones lineales influenciadas por condiciones locales en que se desarrolló su deducción. Para esto, el modelo se basa en cinco velocidades limitantes o restrictivas, que predominan alternadamente sobre la velocidad de equilibrio, en condiciones estables de operación, dependiendo de aquellas que estén actuando sobre los vehículos, para lo cual se utiliza una distribución probabilística (tipo Weibull con parámetro de forma  $\beta$ ). A cada una de las componentes de velocidad es posible incorporarles las condiciones propias de cada región, a partir de 18 parámetros de adaptación que son modificables.

Las expresiones que permiten obtener la velocidad, para un viaje redondo, del modelo HDM III son las siguientes:

### 3.1.1 Velocidad en Flujo Libre

$$V = \frac{7,2}{\frac{1}{V_u} + \frac{1}{V_d}} \quad \text{en (Km/hr)} \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Velocidades $V_u$ (subida) y $V_d$ (bajada), ambas en (m/s).

$$V_u = \frac{E_o}{\left| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c} 1 & 1/\beta & 1 & 1/\beta \\ \hline VDRIVE_u & + & VBRAKE_u & + & VCURVE & + & VRROUGH & + & VDESIR & + & \beta \end{array} \right|} \quad (3.2)$$

Eo

$$Vd = \frac{1}{\left( \frac{1}{VDRIVE_d} + \frac{1}{VBRAKE_d} + \frac{1}{VCURVE} + \frac{1}{VRROUGH} + \frac{1}{VDESIR} \right)^{\frac{1}{B}}}$$

(3.3)

donde:

VDRIVE = velocidad limitante basada en la gradiente y potencia del motor en (m/s).

VBRAKE = velocidad limitante basada en la pendiente y capacidad de frenado en (m/s).

VCURVE = velocidad limitante basada en la rugosidad y severidad de la vía en (m/s).

VDESIR = velocidad deseada, en ausencia de otras limitantes. Se basa en consideraciones de seguridad, económicas y psicológicas en (m/s).

B = parámetro de forma de Weibull.

Eo =  $e^{0,5\sigma^2}$ .

$\sigma^2$  = parámetro del error estándar de la estimación.

### 3.1.3 VDRIVE

Esta componente de la velocidad se desprende de la siguiente relación:

$$\left| \begin{array}{c} \text{FUERZA} \\ \text{DE} \\ \text{CONDUCCION} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{RESISTENCIA} \\ \text{DE} \\ \text{RODADURA} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{RESISTENCIA} \\ \text{DE} \\ \text{GRADIENTE} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{RESISTENCIA} \\ \text{DEL} \\ \text{AIRE} \end{array} \right|$$

Fuerza de Conducción =  $736 * HPDRIVE / VDRIVE$  en (Newton)

Resistencia de Rodadura =  $g * 1000 * GVW * CR$  en (Newton)

Resistencia a Gradiente =  $g * 1000 * GVW * GR$  en (Newton)

Resistencia del Aire =  $0,5 * RHO * CD * AR * VDRIVE^2$ , (New)

donde:

736 = Factor de conversión de HP a Watts.

HPDRIVE = Potencia máxima de conducción (HP)

LOAD = Capacidad de carga en (Ton)

TARE = Peso del vehículo descargado en (Ton)

GVW = Peso bruto del vehículo en (Ton),  $GVW = LOAD + TARE$

g = Aceleración de gravedad en ( $m/s^2$ ) = 9,81

CR = Coefic. de roce de la resistencia de rodadura (adim)

AR = Área frontal en ( $m^2$ )

GR = Gradiente vertical expresada como fracción

CD = Coeficiente aerodinámico de roce del vehículo (adim)

RHO = Densidad del aire en ( $Kg/m^3$ )

$$CR = \begin{cases} 0,0218 + 0,0000467 * QI & \text{para veh. livianos} \\ 0,0139 + 0,0000198 * QI & \text{para veh. pesados} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$GR = \begin{cases} \text{sub}/1000 & \text{para VDRIVEu} \\ \text{baj}/1000 & \text{para VDRIVEa} \end{cases} \quad (3.5)$$

sub y baj corresponden a los metros de desnivel por longitud recorrida en (m/Km)

$$RHO = 1,225 * (1 - 2,26 * 10^{-5} * A) \quad 4,255 \quad (3.6)$$

A = altura sobre el nivel del mar en (m)

El equilibrio de fuerzas queda representado por la siguiente ecuación:

$$736*HPDRIVE = 0,5*RHO*CD*AR*VDRIVE^2 + 1000*g*GVW*(CR+GR)*VDRIVE \quad (3.7)$$

### 3.1.4 VBRAKE

La componente de la velocidad que se expresa como VBRAKE se resume en las siguientes ecuaciones:

$$VBRAKEu = \infty$$

$$VBRAKEa = \begin{cases} \infty & CR \geq \text{baj}/1000 \\ \frac{-736*HPBRAKE}{g*1000*GVW*(CR-\text{baj}/1000)} & CR < \text{baj}/1000 \end{cases} \quad (3.8)$$

HPBRAKE = Potencia máxima de frenado, en HP

### 3.1.5 VCURVE

$$FRATIO = \frac{\text{Fza. Lateral}}{\text{Fza. Normal}} = \frac{VCURVE^2}{g*RC} - \frac{SP}{100} \quad (3.9)$$

$$VCURVE = \sqrt{(FRATIO + SP/100)*g*RC} \quad (3.10)$$

donde:

FRATIO= Razón máx.de fricción = máx(0,02;FRATIO<sub>0</sub>-FRATIO<sub>1</sub>\*LOAD)  
SP = Peraltes promedios de las curvas.

$$SP = \begin{cases} 0,012*C & \text{Caminos pavimentados} \\ 0,017*C & \text{Caminos no pavimentados} \end{cases} \quad (3.11)$$

RC = Radio de curvatura

$$RC = \frac{180000}{\pi * \max(18/\pi; C)} \quad (3.12)$$

### 3.1.6 VROUGH

$$VROUGH = \frac{ARVMAX}{0,0882 * QI} \quad (3.13)$$

donde:

ARVMAX= Máximo valor de la velocidad de la suspensión del vehículo en (mm/s).

### 3.1.7 VDESIR

$$VDESIR = \frac{VDESIR_0 - B_w * W'}{3,6} \quad (3.14)$$

donde:

VDESIR<sub>0</sub>=Valor de VDESIR calibrado en (Km/hr)

B<sub>w</sub> = Magnitud del efecto de ancho de vía en la reducción de la velocidad, en (Km/hr-mt de reducción)

W' = Reducción del ancho de la pista cuando son inferiores a 5 m, en (m). W' = máx (5-W; 0)

W = Ancho real de la calzada en (m).

El proceso llevado a cabo para calibrar estos parámetros a las condiciones nacionales, comenzó por determinar las características del parque automotriz, el que está representado por los vehículos tipo de cada estrato. Los datos requeridos fueron obtenidos de los distribuidores de vehículos, talleres especializados y en terreno. Con esta información y siguiendo las recomendaciones dadas por el estudio brasileño, se obtuvieron los parámetros ligados a las características de los vehículos, tales como área frontal, coeficiente aerodinámico de roce, potencia de conducción, potencia de frenado, carga y tara de chasis y carrocería. Asimismo, el modelo posee un parámetro conocido como Velocidad Deseada, el cual es reflejo del efecto que tienen las condiciones "óptimas" que presenta una determinada vía en el comportamiento de los conductores. Por las condiciones especiales requeridas del camino para obtener

este parámetro (sin pendiente ni curvatura, escasa rugosidad, anchos y con buena visibilidad) es posible utilizar el radar detector de velocidades. Se registró un total de 5698 vehículos en caminos pavimentados y no pavimentados en diversos sectores de la V, VI, VII y Región Metropolitana. Como resultado de esta experiencia se obtuvo velocidades deseadas (VDESIR) disímiles a los entregados por el estudio de Brasil, lo cual se debe tanto a diferencias en las velocidades observadas como a variaciones en las características del parque de ambos países.

Una vez obtenidos los parámetros que recomienda el HDM III para su adaptación, se plantearon las matrices factoriales cuyas variables son las características geométricas observadas en caminos nacionales (con amplios rangos en pendientes, curvaturas y rugosidad) lo que permite comprobar la validez del modelo. Por medio de un análisis estadístico de la representatividad de cada una de éstas, se logró establecer que se requerían 21 secciones en caminos pavimentados y 24 en no pavimentados.

Para determinar la velocidad media de circulación, en terreno se registraron los tiempos de viaje entre los puntos extremos de las secciones de características conocidas (método de las patentes), para cada uno de los vehículos de las categorías consideradas. En secciones rectas se utilizó el radar detector de velocidades. Se obtuvieron 18126 datos representativos de velocidades en caminos pavimentados y 1800 de caminos no pavimentados. Conjuntamente a las mediciones de velocidad se realizaban mediciones de pesaje para camiones, debido a que éstos poseen una apreciable variabilidad en su carga.

Para comprobar la bondad de los modelos en su predicción de la velocidad, se determinó el siguiente coeficiente:

$$B = \sum_{ij} [ 100 * ((V_{pij} - V_{oij}) / V_{oij})^2 ] \quad (3.15)$$

donde:

$V_p$  = Velocidad predicha por el modelo para la sección i, vehículo categoría j

$V_o$  = Velocidad observada en la sección i, vehículo j

Para las 21 secciones de prueba en caminos pavimentados, este coeficiente aplicado a la actual Guía de Vialidad (HDM II) es igual a 169735 (error promedio de cada predicción = 28%), en cambio para el HDM III con los parámetros originales de Brasil alcanza a 128252 (error de 24%). Si se utilizan los parámetros modificados de acuerdo a características del parque automotriz y velocidades deseadas nacionales se obtiene 102808 (error de 21%). Si bien es cierto el HDM III brasileño predice en mejor forma respecto al HDM II, bastan sólo algunos parámetros

modificados para que la adecuación nacional lo supere. Para perfeccionar la adaptación del modelo se decidió realizar una recalibración de los parámetros físico-técnicos. La metodología consistió en escoger secciones cuyas características de geometría y estado hagan que predomine notoriamente la velocidad limitante que se ve afectada por el parámetro en cuestión. Es posible despejar esta velocidad limitante de las ecuaciones de equilibrio si se aceptan conocidas las otras cuatro velocidades restrictivas (lo que equivale a adoptar el resto de los parámetros) y la velocidad observada será levemente inferior a la limitante que se desea obtener, ya que el resto no son restrictivas. Se realizaron sucesivas recalibraciones, que se traduce en analizar u obtener secuencialmente los valores de GVW, FRATIO (FRATIO<sub>0</sub> y FRATIO<sub>1</sub>), HPBRAKE, S y HPDRIVE. Finalmente, se propone un conjunto de parámetros de adaptación que entregan predicciones con un coeficiente B = 32582 (error de 11%). Se concluye, vía análisis estadístico, que las predicciones basadas en los parámetros adoptados son estadísticamente equivalentes a las velocidades observadas. Para el caso de caminos no pavimentados, el coeficiente de error del modelo HDM II alcanza un valor de 318580 (error de 35%), en tanto que al usar el HDM III Brasil, B = 305912 (error de 34%), por su parte el HDM III sujeto a calibración local presenta un coeficiente de 159055 (error de 25%). Cabe mencionar que tanto la variabilidad de las velocidades como la dificultad de obtener datos es significativamente superior en caminos no pavimentados.

### 3.2 Consumo del Recurso Combustible.

El modelo de consumo de combustible desarrollado en Brasil presenta claras ventajas teóricas con relación a los obtenidos anteriormente hasta el HDM II. Se incorporan aspectos de carácter físico-experimental alcanzándose una formulación analítica con parámetros factibles de calibración a condiciones locales. Este misma formulación es consistente con otros estudios recientes sobre el tema desarrollados en Australia (modelo instantáneo y tetramodal), y que hacen posible compatibilizar resultados con modelos de consumo instantáneo, necesarios para la simulación microscópica del tráfico, como el que se propone utilizar en Chile para condiciones de flujo congestionado (González y Godoy, 1988).

La función del HDM III que predice consumos de combustible es la siguiente:

$$FL = 500 * \alpha * \left| \frac{UFCu}{Vu} + \frac{UFCd}{Vd} \right| \text{ en (lt/1000 Km)} \quad (3.16)$$

donde:

$\alpha$  = Factor de adaptación de resultados experimentales al mundo real

$UFC_u$  = Consumo de combustible por unidad de tiempo para tramos con pendiente positiva, en (mlt/s)

$UFC_d$  = Consumo de combustible por unidad de tiempo para tramos con pendiente negativa, en (mlt/s)

$V_u$  = Velocidad en subida en (m/s)

$V_d$  = Velocidad en bajada en (m/s)

$$UFC_u = (UFC_0 + A_3 * HP_u + A_4 * HP_u * CRPM + A_5 * HP_u^2) * 10^{-5} \quad (3.17)$$

$$UFC_d = \begin{cases} (UFC_0 + A_3 * HP_d + A_4 * HP_d * CRPM + A_5 * HP_d^2) * 10^{-5} & HP_d \geq 0 \\ (UFC_0 + A_6 * HP_d + A_7 * HP_d^2) * 10^{-5} & NH_o \leq HP_d < 0 \\ (UFC_0 + A_6 * NH_o + A_7 * NH_o^2) * 10^{-5} & HP_d < NH_o \end{cases} \quad (3.18)$$

$UFC_0$  = Consumo de combustible en función de la velocidad del motor

$$UFC_0 = A_0 + A_1 * CRPM + A_2 * CRPM^2 \quad (3.19)$$

$HP$  = Potencia del motor en (HP)

$$HP_u = [(1000 * CR + sub) * GVW * g * V_u + 0,5 * RHO * CD * AR * V_u^3] / 736 \quad (3.20)$$

$$HP_d = [(1000 * CR - baj) * GVW * g * V_d + 0,5 * RHO * CD * AR * V_d^3] / 736 \quad (3.21)$$

$A_i$  = Parámetros de los modelos de predicción mecánicos

$NH_o$  = Potencia de frenado máxima del vehículo en (HP)

$CRPM$  = Velocidad calibrada del motor en (rpm)

La aplicación directa del modelo de Brasil genera resultados que difieren de la realidad nacional debido en buena parte, a notorias diferencias físicas de los vehículos de Brasil y Chile en peso, tamaño, cilindrada, potencia, etc., lo que justifica una adaptación local de parámetros.

La encuesta sobre rendimientos a usuarios, realizada en este estudio alcanzó un tamaño muestral de 1751 vehículos, desagregados en 1194 vehículos livianos, 347 vehículos de carga y 212 buses.

Con fines de validación del modelo fue necesario hacer algunos supuestos sobre velocidades medias y variaciones de velocidad para condiciones medias de operación en carreteras nacionales. Considerando tanto los rendimientos obtenidos, como las características de los vehículos por categoría se procedió a calibrar los parámetros:  $\alpha$ , CRPM,  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  para vehículos livianos, y  $\alpha$ , CRPM y  $A_3$  para vehículos pesados. La importancia del tema en el marco de la evaluación de proyectos viales hace aconsejable realizar experimentos de consumo de combustible en el país, para cuyos efectos se propone en este mismo estudio, a nivel preliminar, su diseño experimental.

### 3.3 Consumo de Repuestos y Mano de Obra en Mantención

Los ítems repuestos y mano de obra son de gran magnitud en los costos de operación de vehículos, alcanzando valores porcentuales entre 20 y 50% del costo total sin considerar costo de tiempo. Sin embargo, a pesar de su importancia relativa, las incertezas que lleva asociada su determinación, particularmente apreciable en la actual Guía para Evaluar Proyectos Viales (HDM II), confirman la necesidad de analizar profundamente cada una de las metodologías disponibles. Los estudios internacionales revisados presentan problemas de antigüedad (pertenece a las décadas 60 y 70), obsolescencia del parque vehicular, particularidades geográficas, escasas variables físicas en juego y superficies de caminos. Los estudios reportados en las versiones HDM no difieren sustancialmente en su concepción teórica, siendo dependientes del kilometraje acumulado (CKM), rugosidad, valor del vehículo nuevo y coeficientes, que en el caso del HDM II vienen dados como valores numéricos, en tanto que en el HDM III son parámetros susceptibles de adecuación local. El problema del HDM II radica en el extremado aumento de los consumos debido a los incrementos de la rugosidad, generándose costos elevados imposibles de justificar. Situación que no se presenta en el estudio de Brasil.

La función original del HDM III que predice el consumo de repuestos es la siguiente:

$$PC = \begin{cases} CKM^k * C_{sep} * e(C_{spqi}*QI) & QI \leq QI_{sep} \\ CKM^k * (a_0 + a_1*QI) & QI > QI_{sep} \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= C_{sep} * (1-C_{spqi}*QI_{sep}) * e(C_{spqi}*QI_{sep}) \\ a_1 &= C_{sep} * C_{spqi} * e(C_{spqi}*QI_{sep}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$CKM = \begin{cases} CKM & CKM \leq CKM' \\ CKM' & CKM > CKM' \end{cases} \quad (3.24)$$

donde:

- PC = Consumo de repuestos, expresado como fracción del valor del vehículo nuevo sin juego de neumát., cada 1000 Km.
- CKM = Edad promedio en (Km)
- k = Exponente de la edad
- C<sub>sep</sub> = Coeficiente de la relación consumo repuestos/rugosidad
- C<sub>spqi</sub> = Coeficiente exponencial de la relación
- QI<sub>sep</sub> = Valor de transición de la rugosidad
- a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub> = Coeficientes de extensión lineal
- CKM' = Valor límite de los kilómetros recorridos

En tanto, la relación que predice el consumo en horas de mantenimiento es:

$$LH = C_{sh} * PCC_{hpc} * e^{(C_{lhqi} * QI)} \quad (3.25)$$

donde:

$LH$  = Número de horas de mantenimiento por cada 1000 kilómetros.

$C_{sh}$  = Coeficiente de la relación horas mantenimiento/consumo de repuestos.

$C_{lhpc}$  = Exponente del consumo de repuestos en la relación de horas de trabajo en mantenimiento.

$C_{lhqi}$  = Coeficiente de rugosidad en la relación.

El proceso de calibración de los parámetros modificables para Chile, comprendió un análisis estadístico previo sobre el tamaño muestral tal que el error en la predicción no superara un 10%. De acuerdo a esto, se conformó una base de datos compuesta por 71 veh. livianos, 100 camiones y 35 buses para el ítem repuestos, y 52 vch.livianos, 110 camiones y 21 buses para mano de obra. La información recogida para cada uno de los vehículos representó un laborioso trabajo de revisión de todos los gastos en este aspecto en que incurre se durante períodos superiores a un año.

Es conveniente consignar la dificultad en la recolección de los antecedentes requeridos debido a omisiones en pequeñas reparaciones y desconfianza para entregar la información aludiendo al celo profesional (caso de algunas empresas de buses y camiones). Los parámetros que se determinaron con datos nacionales fueron  $C_{sp}$  para consumos de repuestos y  $C_{sh}$  para mano de obra. En este estudio se trabajó inicialmente con el supuesto de bondad en los parámetros explicativos del efecto de cambios en la rugosidad de la carpeta, tal cual fueron calibrados en Brasil. Sin embargo, los resultados obtenidos hicieron necesario plantear algunos cambios. En particular, para los camiones articulados se modificó el parámetro  $C_{spqj}$ , el que se aumentó en 40%, considerando recomendaciones del estudio de Brasil que dice relación con el margen de error asociado, e intentando consistencia con las demás categorías de vehículos pesados.

Del examen de los resultados obtenidos se pudo, también, detectar la baja influencia de la rugosidad -para carpetas deterioradas y en vías no pavimentadas- en los costos del modelo al compararlos con valores de consumo observados en el país. Para lograr compatibilizar la información de terreno con los predichos, se alteró en la ecuación 3.22 la rugosidad que amplifica al parámetro  $a_1$ , agregándose el factor  $\tau(QI - QI_0)$  para las categorías de veh. pesados, calibrándose los parámetros  $\tau$  y  $QI_0$  tal de recoger el impacto en las circunstancias señaladas. Ver ecuación 3.26.  $QI_0$  representa una rugosidad límite inferior, de tal manera que el factor no altere los consumos en

rugosidades bajas. El valor adoptado para este parámetro es 18, que corresponde a 1500 (mm/Km), lo que es equivalente a un pavimento superior nuevo. Como la predicción de los costos de mano de obra están estrechamente ligados a repuestos, la alteración de este último, queda reflejada automáticamente en el primero.

$$PC = CKM^k * (a_0 + a_1 * (QI + r(QI - QI_0))) \quad QI > QI_{sep} \quad (3.26)$$

### 3.4 Consumo de Neumáticos

Tal como en los casos anteriores, los modelos más importantes revisados, anteriores al HDM III, plantean una formulación basada en correlaciones estadísticas agregadas sin posibilidad de adaptación local.

El modelo de Brasil es de concepción diferente, al incorporar aspectos teóricos de carácter físico técnicos. Los parámetros tienen significado físico directo y no provienen de coeficientes de correlación como en los modelos anteriores, quedando abierta su calibración a condiciones particulares de cada país. Además, el modelo brasileño incluye explícitamente el neumático recauchado, lo que permite una modelación más cercana a la realidad, particularmente en países donde existe un amplio uso con este tipo de tratamiento.

Las funciones del HDM III sobre consumo de neumáticos son:

#### 3.4.1 Vehículos Livianos (automóviles y camionetas)

$$TC = \begin{cases} NT * (0,0114 + 0,000137 * QI) & 0 \leq QI \leq 200 \\ NT * 0,0388 & QI > 200 \end{cases} \quad (3.27)$$

#### 3.4.2 Vehículos Pesados (camiones y buses)

$$TC = \frac{NT}{VOL} * \frac{(1+0,01*RREC*NR)}{(1+NR)} * \left| \frac{Cotc + Ccte * CF^s}{L} \right| + 0,0075 \quad (3.28)$$

donde:

NT = Número de neumáticos por vehículo.

RREC = Razón del costo de un neumático recauchado con respecto al costo de un neumático nuevo, en porcentaje (%).

NR = Número de recauchajes por carcasa de neumático.

$$NR = NR_0 * e(-0,00248 * QI - 0,00118 * C) - 1 \quad (3.29)$$

NR<sub>0</sub> = Número base de recauchado.

Cote = Coeficiente de gasto constante.  
 Ctcte= Coeficiente de gasto.  
 CFu : Promedio de la fuerza circunferencial por neumático (en dirección tangencial a la superficie de rodadura), en un tramo de pendiente positiva, en Newtons.  
 CFd = Promedio de la fuerza circunferencial por neumático (en dirección tangencial a la superficie de rodadura), en un tramo de pendiente negativa, en Newtons.  
 CF\* = Promedio de los cuadrados de las fuerzas CFu y CFd

$$CFu = [(1000*CR'+sub)*GVW*g + 0,5*RHO*CD*AR*Vu^2] / NT \quad (3.30)$$

$$CFd = [(1000*CR'-baj)*GVW*g + 0,5*RHO*CD*AR*Vd^2] / NT \quad (3.31)$$

$$CR' = CR + B*(QI-QI\theta) \quad (3.32)$$

CR' = Coeficiente de roce corregido.

L = Fuerza promedio por neumático en dirección perpendicular a la superficie de rodadura, en Newtons.

$$L = 1000 * GVW * g / NT \quad (3.33)$$

VOL = Promedio de volumen de caucho disponible en la banda para ser gastado por cada neumático, en ( $dm^3$ )

~~0,0075-Término de corrección para la predicción de sesgo debido a la no linealidad del modelo.~~

La utilización directa del conjunto de parámetros calibrados en Brasil conduce a resultados de consumo de neumáticos que se aleja de los detectados en las encuestas a usuarios, fabricantes y empresas en Chile. En particular, el modelo de Brasil es poco sensible a la rugosidad. No obstante ello, y aprovechando que la formulación del modelo permite la calibración de parámetros a condiciones locales, se generó una base de datos para la adaptación de los parámetros VOL, NRo, RREC, Cote, Ctcte y NT, la cual incluye consultas directas en terreno, visitas a empresas distribuidoras y fábricas. Los tamaños muestrales, todos en unidades neumático, son 3348 en veh.de carga y 1642 en buses para determinar VOL, 3825 (de los cuales 689 son recauchados) en veh.de carga y 1788 (182 recauchados) en buses para NR, 2447 en veh.de carga y 1692 en buses para RREC, 408 en veh.de carga y 180 en buses para Cote y Ctcte.

El consumo de neumáticos es función principalmente de la rugosidad y de la velocidad de la forma  $\alpha + \beta*QI^2 + \gamma*v^4 + \dots$ , con  $\beta$  y  $\gamma$  similares, y QI y v del mismo orden de magnitud, lo que lleva a una alta dependencia de la velocidad. Este hecho conduce a no recoger, de acuerdo con las estimaciones nacionales, el verdadero impacto de carpetas deterioradas y caminos no pavimentados, mientras que en caminos de baja rugosidad se alcanzan consumos sensiblemente similares, todo

esto debido al efecto mencionado. Para determinar un consumo más próximo al observado en condiciones de rugosidad alta se modificó el coeficiente de roce CR, mediante un CR' que recoge este impacto, que corresponde al original aumentado en  $B^*(QI - QIo)$ . El valor B se calibró con información de consumos en caminos de bajo estándar, en tanto que la constante QIo, al igual que en el caso del ítem repuestos, disminuye la influencia de este factor en caminos de rugosidad baja.

### 3.5 Consumo de Lubricantes

Todos los estudios analizados no son lo suficientemente profundos ya que el ítem representa sólo un 1 a 2% de los costos totales de operación, por lo que se estima que sus incertezas no inciden en forma importante en la globalidad. Este ítem es mencionado solamente en los estudios de Kenya y Brasil. El primero tiene valores de consumo cada 1000 Kms. desagregados exclusivamente por tipo de carpeta para cada categoría de vehículos. En cambio, en Brasil se propone una función lineal con la rugosidad, en que la constante es objeto de calibración local.

La función que predice el consumo de lubricantes es:

$$OC = C_0 + 0,007516 * QI^{1,12} \quad (3.34)$$

donde:

$C_0$  = Término constante representa el consumo marginal.

$0,007516$  = Coeficiente de incremento con la rugosidad.

$1,12$  = Exponente de la rugosidad.

El tamaño muestral para calibrar el parámetro  $C_0$  alcanzó a 806 vehículos livianos, 281 veh. de carga y 172 buses.

### 3.6 Depreciación

Los modelos HDM analizados utilizan el concepto de cantidad de depreciación del vehículo, expresado como fracción del costo de un vehículo nuevo en función de un total de depreciación y del kilometraje recorrido anual. El HDM III tiene la flexibilidad de adaptación local.

La relación del HDM III de costos de depreciación es:

$$DEPREC = ADEP * PVN / AKMo \text{ en } (\$/Km) \quad (3.35)$$

donde:

ADEP = Porcentaje de depreciación anual en (%)

PVN = Precio de Vehículo Nuevo

AKMo = Kilometraje Recorrido Anual

$$AKMo = CKM/EDAD$$

(3.36)

CKM = Edad promedio en (Km)

EDAD = Año actual - Año promedio de fabricación

El estudio desarrollado en nuestro país contempló un método alternativo, de mayor confiabilidad estadística, para alcanzar valores del parámetro ADEP. La información recogida para obtener los parámetros de la función elegida proviene de encuestas directas y revisión de antecedentes de precios de vehículos representativos de las categorías en las fuentes de datos de ventas de vehículos.

El valor de ADEP se determina como el promedio, ponderado por las edades del parque, de la depreciación calculada según las siguientes ecuaciones:

$$DEP = a_0 * EDAD + a_1 * EDAD^2 \text{ para veh. livianos} \quad (3.37)$$

$$DEP : a_0 * EDAD^2 \text{ para veh. pesados} \quad (3.38)$$

Relaciones que fueron encontradas de correlaciones entre la información fuente (datos de precios de reventa de vehículos) y las edades respectivas.

Los tamaños muestrales para determinar los valores de EDAD y AKMo son 1313 veh. livianos, 664 camiones y 875 buses para el primer parámetro, en tanto que 1284 veh. livianos, 548 camiones y 483 buses para el segundo. Por otra parte se dispuso de 501 precios de reventa de vehículos. Estos valores resultan suficientes al ser sometidos previamente a análisis estadístico para probar su representatividad.

### 3.7 Variables de Estado de la Carpeta.

Conjuntamente con la adaptación local de los parámetros de los diversos ítems de las funciones de consumo de recursos, el HDM III amplía los rangos de variables físicas involucradas. En especial, la rugosidad aumenta su rango máximo admisible -que actualmente no puede superar los 14000 (mm/Km)- a valores de 26000 (mm/Km). Las memorias de título de Brüning (1987) y Araya (1988) referidas al uso de rugosímetros permiten avalar el supuesto del HDM III. Por otra parte, el modelo propuesto utiliza unidades IRI o QI para el ingreso en las funciones. Las relaciones entre las diferentes unidades son las siguientes:

$$\begin{array}{l|ll} \text{IRI} & 5,7138 \times 10^{-2} + 9,5826 \times 10^{-4} * R - 2,0498 \times 10^{-8} * R^2 & R \leq 10000 \\ & -0,10878 + 7,69874 \times 10^{-4} * R & R > 10000 \end{array} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} BI &= 630 * IRI^{1.12} \quad \text{en (mm/Km)} & (3.40) \\ QI &= 13 * IRI \quad \text{en (QI's)} & (3.41) \end{aligned}$$

donde

R = Rugosidad en (mm/Km)

BI = Bump Integrator, rugosímetro tipo carro de arrastre.

QI = Quarter Index, unidad del rugosímetro usado en Brasil.

La relación exponencial IRI (R) proviene de Araya (1988), y la relación lineal de la investigación del HDM III realizado por el Departamento de Ingeniería Civil (1989), ambos citados en las referencias del documento, en tanto que la vinculación del IRI con BI y QI tiene como fuente a Araya (1988).

#### 4. APLICACION A EVALUACION DE PROYECTOS VIALES

Es importante conocer el impacto que esta nueva metodología produce en proyectos de inversión. Para ello se contó con cinco estudios recientes realizados para la Dirección de Vialidad.

Se obtuvieron los costos de operación y tiempo aplicando la actual Guía para Evaluar Proyectos Viales (HDM II), el HDM III en su versión original y el HDM III - Chile. Los resultados se muestran en la Tabla N°3. Como se ha mencionado en los numerales del punto 3, el modelo HDM III utiliza unidades de rugosidad QI's, tal que para compatibilizar con las actualmente en uso en nuestro país, se debe recurrir a las relaciones señaladas en 3.7. Adicionalmente, la situación consignada de levantar la restricción del rango superior de esta variable, genera un cambio en el criterio para valores altos de la rugosidad (caso de caminos no pavimentados). En estas circunstancias se debe asimilar el estado cualitativo descrito de la ruta a los valores numéricos de esta variable; de tal manera que, a modo de ejemplo, un camino de ripio en regulares condiciones cambia su valor de 11000 (mm/Km) de acuerdo al actual rango a 13000 (mm/Km) y un camino de ripio en mal estado cambia de los 14000 (mm/Km) a 18000 (mm/Km). Los beneficios provenientes de costos de conservación, el vector de precios y las características geométricas no difieren en los tres métodos analizados.

#### 5. CONCLUSIONES

Se propone, como resultado de esta investigación, una nueva formulación analítica para la estimación de consumos de recursos de costos de operación de vehículos basada en el HDM III. En el informe original se entrega además una proposición metodológica detallada para la estimación del vector de precios, para el desarrollo de procedimientos de actualización

de todo el proceso, para el desarrollo de un experimento de consumo de combustible y se entrega un programa computacional para el cálculo.

El conjunto de resultados obtenidos permite uniformar el proceso de estimación de costos de operación de vehículos y suplir las principales deficiencias de la metodología anterior que le otorgaba una baja confiabilidad. La permanente actualización de todo el proceso requiere de un procedimiento que exige contar con los recursos materiales y humanos por parte de la Dirección de Vialidad. La importancia del tema en la toma de decisión en materia vial lo justifica plenamente.

## REFERENCIAS

Araya L. (1988), Validación del Modelo de Deterioro Brasileño de Caminos No Pavimentados. Aplicación al Caso Chileno, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Brüning W. (1987), Utilización y Calibración de Rugosimetros en Caminos Nacionales, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Claffey P.J. (1971), Highway Research Board, Running Costs of Motor Vehicles as Affected by Road Design and Traffic, National Cooperative Highway Research Program, Report 111, EE.UU.

Comisión de Transporte Urbano (1989), Estudio Estratégico de Transporte Urbano de Santiago (ESTRAUS), Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Transporte Urbano, Santiago, Chile.

Correa C. (1984), Funciones de Consumo de Recursos de Vehículos en Caminos Nacionales, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

CRRI (1982), Road User Cost Study in India, Informe Final, Nueva Delhi, India.

Chesher A. y Harrison R. (1986), Vehicle Operating Costs. Evidence from Developing Countries, University of Bristol, Inglaterra.

De Weille J. (1966), Quantification of Road User Savings, International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, EE.UU.

Dirección General de Metro (1986), Estudio Sistema Tarifario del Metro de Santiago, Santiago, Chile.

González S. y Godoy R., (1988), Uso del Modelo TRARR en Simulación de Tráfico y Evaluación de Proyectos en Caminos de Chile, IV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Junio 1988, Universidad de Mayagüez, Puerto Rico.

Hide H., Abaynayaka S.W., Sayers I. y Wyatt R.J., (1971-1975), The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Vehicle Operating Cost. Department of the Environment. Report LR 672. TRRL (Transport and Road Research Laboratory), Inglaterra.

Kodama, K. (1989), Funciones de Velocidad de Vehículos en Caminos Interurbanos Nacionales, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

MOP (1982), Guía para Evaluar Proyectos Viales, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Santiago - Chile.

Morosiuk G. y Abaynayaka S.W., (1982), Vehicles Operating Costs in the Caribbean: Results of Survey of Vehicle Operators. Department of the Environment. Report LR 1031 TRRL (Transport and Road Research Laboratory), Inglaterra.

Soto, E. (1984), Funciones de Velocidad y Consumo de Combustible de Vehículos en Caminos Nacionales, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Universidad de Chile (1989), Validación y Complementación de Costos Operacionales en Caminos de Chile, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Santiago.

Watanatada, T. et al. (1985), The Highway Design and Maintenance Standards Study, The Highway Design and Maintenance Standards Model HDM III, Model Description and User's Manual, Volume IV, The World Bank, Washington D.C.

Watanatada, T. et al. (1986), The Highway Design and Maintenance Standards Study, Models for Predicting Vehicle Speeds and Operating Costs Based on Mechanistic Principles: Theory and Quantification. Volume II, The World Bank, Washington D.C.

T A B L A N o 1  
PARAMETROS DE LAS FUNCIONES DE CONSUMO DE RECURSOS DEL EBM III - CHILE  
PARA 15 NUEVAS CATEGORIAS DE VEHICULOS

| ITEM | PARAMETRO             | UNIDAD               | CATEGORIAS DE VEHICULOS |          |         |         |         |         |         |          |          |
|------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
|      |                       |                      | A1                      | A2       | A3      | CJ      | CL      | CH      | CA      | BI       | BR       |
|      | Bo                    | adim.                | 1.0148                  | 1.0148   | 1.0148  | 1.0229  | 1.0285  | 1.0318  | 1.0318  | 1.0265   | 1.0265   |
|      | Beta                  | adim.                | 0.274                   | 0.274    | 0.274   | 0.348   | 0.394   | 0.310   | 0.300   | 0.273    | 0.273    |
|      | CD                    | adim.                | 0.45                    | 0.45     | 0.50    | 0.46    | 0.50    | 0.55    | 0.63    | 0.65     | 0.65     |
|      | AR                    | %                    | 2.20                    | 2.21     | 2.42    | 2.48    | 3.52    | 5.08    | 6.17    | 9.43     | 7.05     |
|      | Tara                  | Ton                  | 0.8                     | 1.1      | 1.3     | 1.4     | 3.5     | 6.1     | 13.9    | 9.5      | 1.8      |
|      | Carga                 | Ton                  | 0.2                     | 0.2      | 0.2     | 0.4     | 2.0     | 6.6     | 15.3    | 3.8      | 2.3      |
|      | Peso Tot. (GVW)       | Ton                  | 1.0                     | 1.3      | 1.5     | 1.0     | 5.5     | 12.7    | 29.2    | 13.3     | 9.3      |
|      | HPDRIVE               | HP                   | 25                      | 36       | 56      | 58      | 88      | 197     | 198     | 227      | 99       |
|      | HPSBRAKE              | HP                   | 18                      | 27       | 31      | 33      | 165     | 124     | 264     | 253      | 156      |
|      | FRATIOo PAV           | adim.                | 0.168                   | 0.113    | 0.134   | 0.181   | 0.148   | 0.180   | 0.193   | 0.079    | 0.062    |
|      | FRATIOo BO PAV        | adim.                | 0.124                   | 0.124    | 0.124   | 0.117   | 0.099   | 0.087   | 0.040   | 0.095    | 0.095    |
|      | FRATIO1 PAV           | Ton <sup>-1</sup>    | 0                       | 0        | 0       | 0       | 1.4E-02 | 1.5E-03 | 3.6E-03 | 0        | 0        |
|      | FRATIO1 BO PAV        | Ton <sup>-1</sup>    | 0                       | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        |
|      | ARVMAX                | m/s                  | 259.7                   | 259.7    | 259.7   | 239.7   | 194.0   | 177.7   | 138.9   | 212.8    | 212.8    |
|      | VDESIRO PAV           | km/hr                | 84.8                    | 110.9    | 124.5   | 104.7   | 61.5    | 88.4    | 88.0    | 123.8    | 108.9    |
|      | VDESIRO BO PAV        | km/hr                | 49.7                    | 58.1     | 77.6    | 68.4    | 56.6    | 66.1    | 63.5    | 63.4     | 55.7     |
|      | R <sub>g</sub> PAV    | km/hr/m              | 7.31                    | 7.31     | 7.31    | 3.29    | 3.29    | 3.29    | 3.29    | 3.29     | 3.29     |
|      | R <sub>g</sub> BO PAV | km/hr/m              | 4.32                    | 4.32     | 4.32    | 6.36    | 6.36    | 6.36    | 6.36    | 6.36     | 6.36     |
|      | CO                    |                      |                         |          |         |         |         |         |         |          |          |
|      | Alfa                  | adim.                | 1.02                    | 1        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        | 1        |
|      | CBPH                  | rps                  | 3500                    | 2500     | 2856    | 2696    | 2669    | 1000    | 1700    | 2000     | 2300     |
|      | AB                    | ml lit/s             | -4947                   | 7438     | -9892   | 5413    | -41893  | -22355  | -30558  | -7276    | -7276    |
|      | A1                    | 10/rps               | 29.5                    | 12.6     | 42.1    | 33.8    | 71.6    | 95.0    | 156.1   | 63.5     | 63.5     |
|      | A2                    | AB/rps <sup>-2</sup> | 0                       | 3.85E-03 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        |
|      | A3                    | AB/HP                | 5636                    | 6900     | 2550    | 1000    | 5129    | 3560    | 2900    | 3586     | 4260     |
|      | A4                    | AB/(rps+AB)          | 0                       | 0        | -0.938  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        |
|      | A5                    | AB/HP <sup>2</sup>   | 0                       | 0        | 13.91   | 0       | 0       | 0       | 19.12   | 4.41     | 8.84     |
|      | A6                    | AB/EP                | 4486                    | 6552     | 4590    | 3884    | 2653    | 2334    | 4435    | 2479     | 2479     |
|      | A7                    | AB/EP <sup>2</sup>   | 0                       | 0        | 0       | 0       | 0       | 13.76   | 20.03   | 11.50    | 11.50    |
|      | Mlo                   | HP                   | -10                     | -12      | -15     | -12     | -38     | -85     | -85     | -58      | -58      |
|      | CO                    |                      |                         |          |         |         |         |         |         |          |          |
|      | z                     | adim                 | 0.398                   | 0.398    | 0.398   | 0.398   | 0.371   | 0.371   | 0.371   | 0.371    | 0.371    |
|      | Cosp                  | \$10 <sup>-6</sup>   | 22.58                   | 23.71    | 10.48   | 27.82   | 6.95    | 9.80    | 4.37    | 0.98     | 1.85     |
|      | Cspq1                 | 1/QI                 | 19.79                   | 18.76    | 13.70   | 13.70   | 251.79  | 251.79  | 21.91   | 35.31    | 35.31    |
|      | CKH                   | km                   | 3500000                 | 3500000  | 3000000 | 3200000 | 6000000 | 6000000 | 6000000 | 10000000 | 10000000 |
|      | Gama                  | adim                 | 0                       | 0        | 0       | 0       | 0.78    | 0.78    | 0.78    | 0.78     | 0.78     |
|      | Qlesp                 | QI                   | 120                     | 120      | 120     | 120     | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        |
|      | CKM                   | km                   | 182994                  | 143895   | 153175  | 173737  | 531539  | 622022  | 965748  | 1236626  | 999526   |
|      | CO                    |                      |                         |          |         |         |         |         |         |          |          |
|      | Clhpc                 | adim                 | 0.547                   | 0.547    | 0.547   | 0.547   | 0.510   | 0.510   | 0.510   | 0.510    | 0.510    |
|      | Clhql                 | 1/QI                 | 0                       | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        |
|      | Cph                   |                      | 42.78                   | 41.93    | 55.51   | 49.66   | 160.72  | 155.08  | 287.04  | 75.29    | 183.14   |
|      | CO                    |                      |                         |          |         |         |         |         |         |          |          |
|      | VOL                   | dm <sup>3</sup>      |                         |          |         |         | 3.08    | 9.59    | 0.97    | 18.14    | 8.22     |
|      | MRo                   | adim.                |                         |          |         |         | 1.334   | 1.326   | 1.575   | 1.342    | 1.867    |
|      | BBEC social           | %                    |                         |          |         |         | 58.4    | 56.4    | 56.4    | 56.4     | 56.4     |
|      | BBEC privado          | %                    |                         |          |         |         | 52.9    | 52.9    | 52.9    | 52.9     | 52.9     |
|      | Cotc                  | \$10 <sup>-2</sup>   |                         |          |         |         | 3.288   | 3.459   | 7.141   | 3.389    | 5.635    |
|      | Ctcte                 | \$10 <sup>-2</sup>   |                         |          |         |         | 0.4598  | 0.5000  | 0.5558  | 0.2281   | 0.3928   |
|      | B                     | \$10 <sup>-4</sup>   |                         |          |         |         | 2.574   | 1.989   | 2.378   | 3.960    | 2.970    |
|      | CO                    |                      |                         |          |         |         | 4       | 4       | 6       | 6        | 6        |
|      | BT                    | unidad               |                         |          |         |         | 4       | 4       | 6       | 6        | 6        |
|      | CO                    |                      |                         |          |         |         |         |         |         |          |          |
|      | Co                    | lt/mil km            | 0.887                   | 0.887    | 0.887   | 0.887   | 1.616   | 4.633   | 4.733   | 2.089    | 4.033    |
|      | DEP                   | ADEP                 | %                       | 11.76    | 7.61    | 10.95   | 7.98    | 9.33    | 9.33    | 12.04    | 15.04    |
|      | DEP                   | Edad                 | Años                    | 8.31     | 8.78    | 8.64    | 6.78    | 10.86   | 10.86   | 10.43    | 7.10     |
|      | DEP                   |                      |                         |          |         |         |         |         |         |          |          |

**T A B L A N o 2**  
**PARÁMETROS DE LAS FUNCIONES DE CONSUMO DE RECURSOS DEL RDM III - CHILE**  
**PARA LAS CINCO CATEGORIAS DE VEHICULOS**

| ITEM           | PARAMETRO             | UNIDAD              | CATEGORIAS DE VEHICULOS |         |         |         |          |
|----------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|
|                |                       |                     | AUTOS                   | CTAS.   | C.SIM   | C.ART   | BUSES    |
| VELOCIDADES    | Ro                    | adim.               | 1.0146                  | 1.0226  | 1.0310  | 1.0310  | 1.0265   |
|                | Beta                  | adim.               | 0.274                   | 0.346   | 0.398   | 0.398   | 0.273    |
|                | CD                    | adim.               | 0.47                    | 0.48    | 0.81    | 0.63    | 0.65     |
|                | AR                    | m <sup>2</sup>      | 2.29                    | 2.46    | 4.68    | 6.17    | 9.11     |
|                | Tara                  | Ton                 | 1.1                     | 1.4     | 5.3     | 13.9    | 9.2      |
|                | Carga                 | Ton                 | 0.2                     | 0.4     | 5.2     | 15.3    | 3.6      |
|                | Peso Tot.(GVW)        | Ton                 | 1.3                     | 1.6     | 10.5    | 29.2    | 12.8     |
|                | MPDBIVE               | HP                  | 39                      | 56      | 95      | 199     | 216      |
|                | MPBRAKE               | HP                  | 38                      | 33      | 122     | 264     | 240      |
|                | FRIAT.00 PAV          | adim.               | 0.113                   | 0.101   | 0.115   | 0.103   | 0.077    |
|                | FRIAT.00 NO PAV       | adim.               | 0.124                   | 0.117   | 0.899   | 0.040   | 0.095    |
|                | FRIAT.01 PAV          | Ton <sup>-1</sup>   | 0                       | 0       | 4.01-03 | 3.81-03 | 0        |
|                | FRIAT.01 NO PAV       | Ton <sup>-1</sup>   | 0                       | 0       | 0       | 0       | 0        |
|                | ARMAX                 | m/s                 | 259.7                   | 239.7   | 181.9   | 130.9   | 212      |
|                | VDESIRO PAV           | km/hr               | 105.9                   | 104.7   | 88.3    | 88.8    | 121      |
|                | VDESIRO NO PAV        | km/hr               | 58.2                    | 68.4    | 59.3    | 63.5    | 62.3     |
|                | I <sub>0</sub> PAV    | km/hr/m             | 7.31                    | 7.31    | 3.29    | 3.29    | 3.29     |
|                | I <sub>0</sub> NO PAV | km/hr/m             | 4.32                    | 4.32    | 8.36    | 6.36    | 6.36     |
| COMBUSTIBLE    | Alfa                  | adim.               | 1                       | 1       | 1       | 1       | 1        |
|                | CBPH                  | rps                 | 2838                    | 2806    | 2806    | 1700    | 2098     |
|                | AB                    | sl lt/s             | -375                    | 5413    | -27882  | -30559  | -7276    |
|                | A1                    | AB/rps              | 23.2                    | 33.8    | 88.8    | 156.1   | 63.5     |
|                | A2                    | AB/rps <sup>2</sup> | 0                       | 0       | 0       | 0       | 0        |
|                | A3                    | AB/HP               | 5724                    | 1068    | 3913    | 2900    | 4200     |
|                | A4                    | AB/(rps*HP)         | 0                       | 0       | 0       | 0       | 0        |
|                | A5                    | AB/HP <sup>2</sup>  | 4.09                    | 0       | 14.15   | 4.41    | 8.64     |
|                | A6                    | AB/HP               | 5474                    | 3684    | 2459    | 4435    | 2479     |
|                | A7                    | AB/HP <sup>2</sup>  | 0                       | 0       | 3.56    | 26.68   | 11.58    |
|                | EHO                   | HP                  | -12                     | -12     | -71     | -85     | -58      |
| REPRODUCCIONES | k                     | adim.               | 0.308                   | 0.308   | 0.371   | 0.371   | 0.371    |
|                | C <sub>0</sub> sp     | *10 <sup>-6</sup>   | 21.92                   | 27.82   | 0.88    | 4.37    | 1.03     |
|                | C <sub>0</sub> sq1    | 1/QI                | 13.70                   | 13.70   | 251.79  | 21.91   | 35.31    |
|                | CBH                   | km                  | 3000000                 | 3000000 | 6000000 | 6000000 | 10000000 |
|                | Gamma                 | adim.               | 0                       | 0       | 0.78    | 0.78    | 0.78     |
|                | Q1dsp                 | QI                  | 120                     | 120     | 0       | 0       | 0        |
|                | CKH                   | km                  | 155355                  | 173737  | 749534  | 985746  | 1203431  |
| MATERIAL       | Clhpc                 | adim                | 0.347                   | 0.347   | 0.519   | 0.519   | 0.519    |
|                | Clhgl                 | 1/QI                | 0                       | 0       | 0       | 0       | 0        |
|                | Colb                  |                     | 48.18                   | 49.68   | 157.17  | 287.84  | 91.79    |
| ESTADISTICOS   | VOL                   | m <sup>3</sup>      |                         |         | 8.10    | 9.97    | 9.88     |
|                | MHo                   | adim.               |                         |         | 1.326   | 1.575   | 1.418    |
|                | RINC social           | %                   |                         |         | 56.4    | 56.4    | 56.4     |
|                | RINC privado          | %                   |                         |         | 52.9    | 52.9    | 52.9     |
|                | Cotc                  | *10 <sup>-2</sup>   |                         |         | 3.411   | 7.141   | 3.614    |
|                | Cctce                 | *10 <sup>-2</sup>   |                         |         | 0.4898  | 0.5556  | 0.2436   |
|                | B                     | *10 <sup>-4</sup>   |                         |         | 2.128   | 2.370   | 3.825    |
| LITERATURA     | NT                    | unidad              |                         |         | 4       | 4       | 6        |
|                | Co                    | lt/mil Km           |                         |         | 0.807   | 0.807   | 3.432    |
| DESP           | ADRP                  | %                   |                         |         | 9.58    | 7.98    | 9.33     |
|                | Edad                  | Años                |                         |         | 0.59    | 6.78    | 10.86    |
|                |                       |                     |                         |         |         | 10.43   | 7.61     |

T A B L A N ° 3  
RESUMEN EVALUACIONES ECONOMICAS DE COMPARACION

CASO : SITUACION SIN PROYECTO = RIPIO  
SITUACION CON PROYECTO = RIPIO

| CAMINO       | LONG. INVERSI. | HDM III - CHILE | SITUACION SIN PROYECTO = RIPIO | HDM III - BRASIL |       | TRANSITO | RUGOSIDADES (20)   |
|--------------|----------------|-----------------|--------------------------------|------------------|-------|----------|--------------------|
|              |                |                 |                                | TIRCO            | B/C   |          |                    |
| CHACO -      | 10,993         | 568,97          | 14,79                          | 1,18             | 27,30 | 2,08     | 1.67               |
| LA UNION -   | 19,993         | 568,97          | 14,79                          | 1,18             | 21,75 | 1,67     | 101                |
| LIPS TRANCAS | -              | -               | -                              | -                | -     | -        | 11000 <1-10> 7000  |
| VULCUN -     | 9,178          | 227,94          | 40,28                          | 3,04             | 49,79 | 3,55     | 55,14              |
| SAN PATRICIO | -              | -               | -                              | -                | -     | -        | 14000 <11-20> 7000 |
|              |                |                 |                                |                  |       |          | 11000 <11-20> 7000 |

CASO : SITUACION SIN PROYECTO = RIPIO  
SITUACION CON PROYECTO = TRAT. SUPERF. DOBLE

| CAMINO       | LONG. INVERSI. | HDM III - CHILE | SITUACION SIN PROYECTO = RIPIO | HDM III - BRASIL |       | TRANSITO | RUGOSIDADES (20)           |
|--------------|----------------|-----------------|--------------------------------|------------------|-------|----------|----------------------------|
|              |                |                 |                                | TIRCO            | B/C   |          |                            |
| CHACO -      | 10,993         | 568,97          | 14,79                          | 1,29             | 23,69 | 1,95     | 18,94                      |
| VULCUN -     | 9,178          | 180,004         | 15,79                          | 1,29             | 23,69 | 1,95     | 308+10                     |
| SAN PATRICIO | -              | -               | -                              | -                | -     | -        | 9000 <1-10> 20000 <1-10>   |
| CHARPA -     | 9,740          | 156,5771        | 30,38                          | 2,65             | 46,72 | 4,21     | 533+21                     |
| PINTUE T-2   | -              | -               | -                              | -                | -     | -        | 11000 <11-20> 2783 <11-20> |
|              |                |                 |                                |                  |       |          | 14000 <11-20> 3722 <20>    |
|              |                |                 |                                |                  |       |          | 11000 <11-20> 4010 <20>    |

CASO : SITUACION SIN PROYECTO = CHAPETRA ASFALTICA  
SITUACION CON PROYECTO = TRAT. SUPERF. DOBLE

| CAMINO      | LONG. INVERSI. | HDM III - CHILE | SITUACION SIN PROYECTO = RIPIO | HDM III - BRASIL |       | TRANSITO | RUGOSIDADES (20)  |
|-------------|----------------|-----------------|--------------------------------|------------------|-------|----------|-------------------|
|             |                |                 |                                | TIRCO            | B/C   |          |                   |
| CHACO -     | 10,140         | 340,959         | 12,91                          | 1,06             | 21,09 | 1,64     | 16,26             |
| LA SERENA - | 10,140         | 340,959         | 12,91                          | 1,06             | 21,09 | 1,64     | 1014              |
| CHILLAN T-2 | -              | -               | -                              | -                | -     | -        | 4700 <1-10> 20000 |
|             |                |                 |                                |                  |       |          | 4056 <11-20> 2134 |
|             |                |                 |                                |                  |       |          | 4008 <20> 2316    |

(12): Los modelos HDM III contemplan el cambio de la rugosidad de 9000 a 11000, 11000 a 13000 y 14000 a 16000.

(22): Los modelos HDM III contemplan el cambio de la rugosidad de 9000 a 11000, 11000 a 13000 y 14000 a 16000.

(3): El tránsito que se agrade corresponde a tránsito generalizado por el proyecto de mejoramiento.