

**ANÁLISIS DE FACTORES RELACIONADOS CON LA CALIBRACIÓN DEL
MODELO DE EFECTOS DE LOS USUARIOS (RUE) DEL HDM-4 PARA VÍAS DE
BOYACÁ**

JHON FREDY CALLEJAS PÉREZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
TUNJA
NOVIEMBRE DE 2019**

**ANÁLISIS DE FACTORES RELACIONADOS CON LA CALIBRACIÓN DEL
MODELO DE EFECTOS DE LOS USUARIOS (RUE) DEL HDM-4 PARA VÍAS DE
BOYACÁ**

JHON FREDY CALLEJAS PÉREZ

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería con énfasis en Infraestructura Vial

Director:
Jorge Nevardo Prieto Muñoz
Doctor en Ingeniería e infraestructura de los transportes

Línea de Investigación:
Gestión de la Infraestructura Vial
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GINFRAVIAL-

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
TUNJA
NOVIEMBRE DE 2019**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad y Fecha (día, mes, año)

DEDICATORIA

A mi esposa Leidy por darme todo su apoyo y amor, así como su paciencia para concluir con una meta más y especialmente a mi amada hija Isabel Sofía, quien llegó como una bendición para ser siempre mi inspiración, motivación y orgullo en la vida.

A mis padres, Ana y José que, con sus valiosos consejos y su perseverante apoyo, me han permitido crecer como persona y llegar hasta este punto.

A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron con aportes para la consecución de este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de vivir, por acompañarme en todo momento de dificultad y por haberme ayudado a alcanzar las metas propuesta, a mi esposa por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas. A mis hermanos que siempre han estado dispuestos para escucharme y colaborarme en cada uno de mis propósitos.

Al finalizar este estudio, es necesario reconocer que no hubiese sido posible su finalización sin la ayuda y el apoyo desinteresado de todas y cada una de las personas que aportaron parte de su tiempo para el desarrollo del estudio, en especial al Ingeniero Jorge Nevarado Prieto Muñoz, Director del Proyecto, por sus valiosos consejos, enseñanzas y orientación a lo largo del proyecto y en todo momento que fue necesario.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN	14
1. ESTADO DEL ARTE.....	16
1.1. DESARROLLO DEL ESTUDIO	17
1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y SUS MODELOS	18
1.3. CALIBRACIÓN.....	20
1.3.1. Generalidades	21
1.3.2. Nivel 1 – Aplicación.....	24
1.3.3. Nivel 2 – Calibración	25
1.3.4. Nivel 3 – Adaptación	25
1.4. ANTECEDENTES DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR COV	26
1.4.1. El estudio ISOHDM.....	27
1.5. EFECTOS SOBRE USUARIOS DE LAS CARRETERAS	28
1.5.1. Efectos sobre los usuarios de las carreteras en HDM-III.....	28
1.5.2. Efectos sobre los usuarios de las carreteras en HDM-4.....	29
1.6. AVANCES EN COLOMBIA	30
1.6.1. Contrato de Consultoría No. IDU-BM-112 de 2009 entre el IDU y TNM LIMITED.....	30
1.6.2. Costos de operación vehicular INVIAS	31
1.7. SÍNTESIS.....	32
2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EFECTOS SOBRE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS	34
2.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS PROYECTOS DE CARRETERAS....	34
2.1.1. Componentes del costo del transporte	36
2.2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	37
2.2.1. Alternativas de proyecto.....	37
2.3. DESCUENTOS	38
2.3.1. Valor presente neto (VPN)	38
2.3.2. Tasa interna de retorno (TIR)	38
2.3.3. Relación beneficio/costo (B/C).....	38
2.4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO RUE DEL HDM-4.....	38
2.5. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS.....	39
2.6. COSTOS DE TRANSPORTE MOTORIZADO.....	42
2.7. TRANSPORTE NO MOTORIZADO.....	43
2.8. SEGURIDAD EN LA CARRETERA	43

2.9.	COSTOS TOTALES SOBRE LOS USUARIOS DE LA CARRETERA	44
3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO EFECTOS SOBRE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS	46
3.1.	EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LAS PREDICCIONES DE HDM-4 46	
3.1.1.	Efectos sobre los usuarios de la carretera: encuestas controladas	46
3.1.2.	Efectos sobre los usuarios de la carretera: encuestas de tarifas	46
3.1.3.	Efectos sobre los usuarios de la carretera: encuestas del parque automotor.....	48
3.2.	SENSIBILIDAD DE HDM-4	48
3.2.1.	Sensibilidad para el modelo efectos sobre los usuarios de la carretera .	49
3.2.2.	Clases de sensibilidad	51
3.3.	CALIBRACIÓN DE LA FLOTA VEHICULAR PARA VÍAS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ SEGÚN EL MODELO RUE EN HDM-4.....	52
3.3.1.	Selección de vehículos representativos.	52
3.3.2.	Selección de tipos de vehículos de la flota vehicular en Boyacá.....	54
3.3.3.	Características y estadísticas de la flota vehicular en Boyacá.	54
3.3.4.	Definición de datos de entrada de la flota vehicular en Boyacá para el HDM-4.	61
3.3.5.	Datos de entrada de calibración en el sistema HDM-4.....	64
3.3.6.	Base de datos de entrada en el sistema HDM-4.....	65
3.4.	CALIBRACIÓN DEL MODELO RUE EN HDM-4	65
3.4.1.	Calibración de variables de nivel 1 para vías de Boyacá – Aplicación básica.	67
3.4.2.	Calibración de variables de nivel 2 para vías de Boyacá – Relaciones primarias.	96
3.4.3.	Calibración de variables de nivel 3 para vías de Boyacá – Adaptación del modelo.	116
4.	PARÁMETROS SUGERIDOS PARA EL MODELO RUE EN VÍAS DE BOYACÁ....	119
4.1.	ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS PARA LAS CONDICIONES LOCALES.....	119
4.1.1.	Características de la vía.....	120
4.1.2.	Herramienta RUC para determinación de costos de usuarios.	122
4.2.	CALIBRACIÓN DE SUBMODELOS PARA VÍAS DE BOYACÁ.....	134
4.2.1.	Calibración submodelo flujo – velocidad.	135
4.3.	ESTIMACIÓN DE COSTOS DE USUARIOS DE ACUERDO CON LA ADAPTACIÓN DEL MODELO UTILIZADO.....	138
4.4.	DESARROLLO DEL MODELO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	139
4.4.1.	Costos y beneficios.....	139
4.4.2.	Análisis económico.	141

5. CONCLUSIONES.....	142
6. RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	147

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1 Parámetros del modelo RUE y sus niveles de calibración en HDM-4.....	22
Tabla 1.2 Fuentes de datos de calibración y jerarquía de los recursos de RUE	24
Tabla 3.1 Clases de sensibilidad de HDM	49
Tabla 3.2 Clases de sensibilidad para el modelo RUE de HDM-4	51
Tabla 3.3 Clasificación vehicular para cada tipo de la flota vehicular en Boyacá	60
Tabla 3.4 Costos relacionados con llantas por tipo de vehículo en Boyacá	62
Tabla 3.5 Flota vehicular para vías de Boyacá en relación con clasificación del sistema HDM-4.....	71
Tabla 3.6 Peso máximo por eje según Resolución 4100 de 2004	72
Tabla 3.7 Modificación del artículo 8 de la Resolución 4100 de 2004	73
Tabla 3.8 Información horaria vehicular de las estaciones maestras.....	74
Tabla 3.9 Factores equivalentes de vehículos livianos, según categorías vehiculares de peajes en Colombia.....	74
Tabla 3.10 Parámetros predefinidos del modelo de relación capacidad-velocidad en HDM-4.....	76
Tabla 3.11 Factores de reducción de la capacidad por zonas de adelantamiento prohibido en carreteras de dos carriles.....	76
Tabla 3.12 Factores de reducción de la capacidad por porciones direccionales en carreteras de dos carriles	76
Tabla 3.13 Factores de reducción de la capacidad por ancho del carril y berma en carreteras de dos carriles	77
Tabla 3.14 Factores de correlación a la capacidad por pendiente (Fpe).....	77
Tabla 3.15 Factores de correlación a la capacidad por distribución por sentido (Fd) ..	77
Tabla 3.16 Factores correlación a la capacidad por efecto combinado de ancho de carril y berma (Fcb	78
Tabla 3.17 Valor promedio de vida útil del vehículo, expresada en años.....	79
Tabla 3.18 Parámetros de uso de vehículos en Boyacá para análisis en RUE	81
Tabla 3.19 Parámetros predefinidos de VDESIR en HDM-4.....	84
Tabla 3.20 Valores recomendados de VDESIR para vías de Boyacá	84
Tabla 3.21 Parámetros predefinidos de PDRIVE en HDM-4.....	85
Tabla 3.22 Valores recomendados de PDRIVE para vías de Boyacá	86
Tabla 3.23 Tipo de neumático, diámetro y número de ruedas para vías de Boyacá....	88
Tabla 3.24 Parámetros del modelo de desgaste de neumáticos	90
Tabla 3.25 Valores predefinidos del consumo de neumáticos en HDM-4	91

Tabla 3.26 Valores recomendados de consumo de neumáticos en vías de Boyacá ...	91
Tabla 3.27 Valores predefinidos de HDM-4 para los parámetros de uso del vehículo .	93
Tabla 3.28 Valores recomendados de parámetros de uso del vehículo en vías de Boyacá	93
Tabla 3.29 Valores recomendados de parámetros de resistencia aerodinámica para vías de Boyacá	94
Tabla 3.30 Valores recomendados de potencia de frenado para vías de Boyacá	95
Tabla 3.31 Valores recomendados para velocidad del motor en vías de Boyacá	96
Tabla 3.32 Parámetros definidos de velocidad deseada para vías de Boyacá.....	97
Tabla 3.33 Datos de entrada de vías de Boyacá para integrar en el sistema HDM-4..	98
Tabla 3.34 Estudio de los datos de la velocidad-regularidad	99
Tabla 3.35 Determinación de los valores de IRI para las vías de Boyacá	100
Tabla 3.36 Valores PCSE por clase de vehículo según HDM-4	105
Tabla 3.37 Valores PCSE recomendado para vías de Boyacá	106
Tabla 3.38 Coeficientes de regresión y ajuste de parámetros del modelo de consumo de combustible.....	109
Tabla 4.1 Determinación de periodos para la estación Albarracín.....	136
Tabla 4.2 Determinación de periodos para la estación El Roble	137
Tabla 4.3 Determinación de periodos para la estación El Roble	138
Tabla 4.4 Impacto de los componentes de los costos de usuarios	139

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Estructura del sistema HDM-4	19
Figura 2.1 Análisis de costos ciclo de vida para proyectos de carreteras en HDM-4...	35
Figura 2.2 Módulos de los efectos sobre los usuarios	39
Figura 2.3 Definición de categorías, clases y tipos de vehículos motorizados	40
Figura 2.4 Definición de categorías, clases y tipos de vehículos no motorizados.....	41
Figura 3.1 Componentes de RUE y sus interacciones en HDM-4	50
Figura 3.2 Clasificación vehicular del parque automotor para vías de Boyacá.....	59
Figura 3.3 Organización de los parámetros para moto y vehículo liviano pequeño	65
Figura 3.4 Prioridades de la calibración de RUE en HDM-4	67
Figura 3.5 Clasificación de vehículos rígidos de carga según el Ministerio de Transporte	69
Figura 3.6 Clasificación de vehículos de carga tipo semirremolque según el Ministerio de Transporte	70
Figura 3.7 Clasificación de vehículos de carga tipo remolque según el Ministerio de Transporte	70
Figura 3.8 Modelo de la relación flujo/velocidad en HDM-4	75
Figura 3.9 Efecto de β en la velocidad pronosticada en HDM-4.....	83
Figura 3.10 Nomenclatura estándar de los neumáticos en HDM-4	86
Figura 3.11 Lectura estándar de una llanta.....	87
Figura 3.12 Cálculo de los factores que inciden en el volumen de desgaste de neumáticos en HDM-4.....	88
Figura 3.13 Modelo de amplitud para la velocidad deseada de HDM-4.....	98
Figura 3.14 Métodos de estimación de la capacidad	101
Figura 3.15 Efecto del ancho en la capacidad	102
Figura 3.16 Estimado de la capacidad de los flujos observados	103
Figura 3.17 Efecto de la regularidad en la aceleración del cuerpo – Opus (1999).....	113
Figura 4.1 Datos de Entrada – Características de la Vía RUC – Boyacá.....	120
Figura 4.2 Interfaz principal de herramienta RUC – Boyacá	123
Figura 4.3 Datos e información de entrada de la flota vehicular	124
Figura 4.4 Datos de calibración de la flota vehicular	125
Figura 4.5 Característica de la vía.....	127
Figura 4.6 Parámetros de sensibilidad	128
Figura 4.7 Características de la red vial.....	128

Figura 4.8 Datos de análisis costo beneficio	128
Figura 4.9 Costos unitarios de usuario	129
Figura 4.10 Recursos y desempeño por 1000 vehículos-km	130
Figura 4.11 Emisiones.....	130
Figura 4.12 Sensibilidad en la rugosidad	131
Figura 4.13 Coeficientes RONET	131
Figura 4.14 Sensibilidad en la velocidad límite	132
Figura 4.15 Sensibilidad en el tránsito.....	132
Figura 4.16 Gráfico de costos de usuario para un tipo de vehículo	133
Figura 4.17 Gráfico de costos de usuario para todos los vehículos.....	133
Figura 4.18 Resultados de análisis costo – beneficio en alternativas de proyecto	134
Figura 4.19 Submodelo Flujo Velocidad del HDM-4	135
Figura 4.20 Distribución horaria de la frecuencia de flujo – HDM-4.....	136
Figura 4.21 Distribución horaria de la frecuencia para la estación Albarracín.....	136
Figura 4.22 Distribución horaria de la frecuencia para la estación El Roble.....	137
Figura 4.23 Distribución horaria de la frecuencia para la estación Tuta.....	137

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1. COSTOS DE TRANSPORTE MOTORIZADO, EN EL ARCHIVO: \\ Anexo 1_Costos_de_transporte_motorizado.docx [CD-ROM]
- ANEXO 2. COSTOS DE TRANSPORTE NO MOTORIZADO, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 2_Costos_de_transporte_no_motorizado.docx [CD-ROM]
- ANEXO 3. SEGURIDAD EN LA CARRETERA, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 3_Seguridad_en_la_carretera.docx [CD-ROM]
- ANEXO 4. BASE DE DATOS ENTRADA FLOTA VEHICULAR, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 4_Base_datos_entrada_flota_vehicular.xlsx [CD-ROM]
- ANEXO 5. DATOS RECOMENDADOS PARA RUC BOYACÁ, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 5_Datos_recomendados_RUC_Boyacá.xlsx [CD-ROM]
- ANEXO 6. HERRAMIENTA RUC BOYACÁ 2018, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 6_Herramienta_RUC_Boyacá_2018 [CD-ROM]
- ANEXO 7. RESUMEN RESULTADOS RUC BOYACÁ, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 7_Resumen_resultados_RUC_Boyacá [CD-ROM]
- ANEXO 8. CÁLCULOS VARIOS PARA RUE BOYACÁ, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 8_Cálculos_varios_RUE_Boyacá.xlsx [CD-ROM]
- ANEXO 9. MANUAL DE USUARIO HERRAMIENTA RUC, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 9_Manual_Usuario_Herramienta_RUC.docx [CD-ROM]
- ANEXO 10. SOPORTES DE CÁLCULO Y FUENTES DE INFORMACIÓN, EN EL ARCHIVO: \\ ANEXO 10_Soportes_y_fuentes_de_información [CD-ROM]

RESUMEN

El análisis de inversiones en carreteras requiere determinar los costos y beneficios en el ciclo de vida de las carreteras, para lo cual es necesario modelar los diferentes costos en que incurren los usuarios, así como el comportamiento del pavimento; estos dos elementos se relacionan entre sí para determinar niveles de costos, ya que la calidad de servicio que presta el pavimento influye directamente en los costos de los usuarios. No obstante, los estudios de costos de usuarios de carreteras aún siguen siendo muy generales para el estudio y evaluación de proyectos locales.

Por lo anterior, la presente investigación propone el estudio de los factores que se deben tener en cuenta para calibrar el modelo de costos de los usuarios, RUE (Road User Effects - efectos sobre los usuarios de las carreteras) dentro del sistema HDM-4 aplicado a las vías de Boyacá, a partir del estudio de bibliografía relacionada con el tema, la recopilación y revisión del estado de arte, de la literatura relevante, las prácticas actuales, y la información de los datos relativos a la calibración del modelo de efectos de los usuarios en los costos de operación de los vehículos. La investigación se centra en el modelo de costos de usuarios, RUE, sin tener en cuenta el modelo de deterioro y efecto del mantenimiento en los pavimentos.

Como resultado, se obtiene un análisis detallado y coherente del modelo que permitirá disponer de una herramienta posible de usar para realizar estudios económicos en proyectos viales aplicados a las condiciones regionales de Boyacá.

Palabras clave: modelo RUE, efectos de usuario, HDM-4, calibración, condiciones locales, carreteras, costos de operación.

ABSTRACT

The analysis of investments in roads requires determining costs and benefits in the life cycle of roads, for which it is necessary to model the different costs incurred by users, as well as pavement behavior; These two elements are related to each other to determine cost levels, since the quality of service provided by the pavement directly influences user costs. However, road user cost studies are still very general for the study and evaluation of local projects.

Therefore, this research proposes the study of the factors that must be taken into account to calibrate the user cost model, RUE (Road User Effects - effects on road users) within the applied HDM-4 system to the ways of Boyacá, from the study of bibliography related to the subject, the collection and review of the state of the art, of the relevant literature, current practices, and the information of the data related to the calibration of the effects model of the users in the operating costs of the vehicles. The research focuses on the user cost model, RUE, without taking into account the deterioration model and the effect of pavement maintenance.

As a result, it was obtained a detailed and coherent analysis of the model that will allow for a possible tool to be used for economic studies in road projects applied to the regional conditions of Boyacá.

Key words: RUE model, user effects, HDM-4, calibration, local conditions, roads, operating costs.

INTRODUCCIÓN

El modelo HDM-4 es una herramienta de tecnología de punta para el análisis de decisiones de inversión de carreteras basada en la evaluación comparativa de los costos y beneficios de las alternativas y estrategias de inversión.

HDM-4 se utiliza para realizar estudios técnicos y económicos de proyectos viales en sus diferentes fases. El modelo original utiliza información obtenida de diferentes países del mundo; para evaluar un proyecto específico es necesario calibrarlo para obtener resultados representativos que orienten la toma de decisiones adecuadas.

Para realizar un trabajo integral, HDM-4 contiene una serie de submodelos que analizan diferentes aspectos de un proyecto vial. Para aplicar el modelo correctamente, es necesario asegurar que los datos de entrada sean apropiados y que los mismos hayan sido convenientemente calibrados. El sistema HDM-4 es bastante complejo por la cantidad de variables y relaciones entre estas; cada zona requiere una calibración específica para obtener resultados válidos.

Para el caso del modelo RUE (Road User Effects - efectos sobre los usuarios de las carreteras), unos elementos fundamentales son los tipos de vehículos a considerar en el análisis. Para utilizar el modelo en el análisis de proyectos viales es necesario seleccionar vehículos representativos del parque automotor, recopilar información sobre sus características y costos de operación para utilizarlos en el modelo.

El modelo RUE pronostica las velocidades del tránsito y los consumos de los componentes del RUE (combustible, neumáticos, etc.); multiplicando éstos por sus costos unitarios individualmente se obtiene el RUE a lo largo del tiempo.

La presente investigación aborda el estudio de los factores que se deben tener en cuenta para calibrar el modelo de costos de los usuarios, RUE, dentro del sistema HDM-4 aplicado a las condiciones vías del Departamento de Boyacá. El modelo RUE involucra varios aspectos: costos de operación vehicular, tiempos de viaje, costos de accidentes y emisiones de vehículos

El resultado de este proceso es la calibración del modelo RUE para realizar estudios de evaluación técnica y económica de proyectos de carreteras para condiciones de vías de Boyacá. El desarrollo de la investigación contempla estudio de bibliografía relacionada con el tema, la recopilación y revisión del estado de arte, de la literatura relevante, las prácticas actuales, y la información de los datos relativos a la calibración del modelo de efectos de los usuarios en los costos de operación de los vehículos.

La investigación se centra en el modelo de costos de usuarios, RUE, no trata el modelo de deterioro y efecto del mantenimiento en los pavimentos. No obstante, para correr el modelo RUE se dispone de información de sectores de vías; se seleccionaron algunos corredores viales del Departamento de Boyacá y se le suministró al modelo la información básica que permitió realizar análisis con cierto grado de confiabilidad.

Como resultado principal de la investigación, se planteó desarrollar un procedimiento metodológico que permita analizar y determinar los factores relacionados con la calibración del modelo para poder evaluar los costos de usuario y con mayor énfasis los

denominados COV (costos de operación vehicular) en unos corredores viales específicos.

La metodología planteada incorpora criterios de evaluación económica que permite analizar las variables y relaciones que contiene el modelo RUE e identifica los efectos específicos que se tienen al realizar esta evaluación a través de la herramienta RUC “Sistema de Cálculo de Costos de Usuarios” para las vías de Boyacá, que se basa estrictamente en el modelo RUCKS versión 2.0 desarrollado por el Banco Mundial. Esta herramienta ha sido diseñada para calcular los costos unitarios de usuarios de la red vial relacionados con los parámetros de velocidad, tiempos de viaje, costos de operación vehicular y emisiones; RUC adoptó el Modelo de Estándares para Diseño y Mantenimiento Vial HDM-4 Versión 2.01.

El presente informe del trabajo de investigación, contiene seis capítulos que se describen brevemente a continuación.

Capítulo 1: presenta el marco referencial que comprende un componente teórico en el cual se incluye una síntesis del estado del arte y antecedentes sobre el tema. Presenta los aspectos generales del HDM-4 y se describen las principales características del modelo de efectos sobre los usuarios de las carreteras, RUE, (Road User Effects), desarrolladas por diferentes entidades internacionales y los avances en investigaciones para el desarrollo y calibración del modelo RUE en Colombia.

Capítulo 2: describe las principales características del modelo de efectos sobre los usuarios de las carreteras, RUE. Detalla de manera puntual la evaluación económica de los proyectos de carreteras, el sistema de clasificación de los vehículos, los costos de transporte motorizado y no motorizado y finalmente, la seguridad junto con los costos totales de los usuarios en la carretera.

Capítulo 3: contiene una descripción detallada de la calibración y adaptación del modelo de efectos sobre los usuarios de las carreteras. Incluye la evaluación de la confiabilidad y los diferentes grados de sensibilidad de HDM-4 para el modelo. Así mismo, presenta en detalle la calibración de la flota vehicular para las vías del Departamento de Boyacá y la calibración detallada del modelo RUE en HDM-4.

Capítulo 4: contiene el proceso y como resultado, los parámetros sugeridos para el modelo RUE en vías de Boyacá. Presenta los resultados de adaptación de los modelos y la calibración de los submodelos para las condiciones del Departamento de Boyacá junto con las alternativas planteadas. Incluye la estimación de los costos de usuarios de acuerdo con la adaptación del modelo utilizado y el desarrollo del modelo de evaluación económica. Para la estimación de los costos, presenta el cálculo de costos de usuario para cada uno de los corredores analizados y los resultados finales del costo del usuario, obtenido de la sumatoria de los costos de operación vehicular (COV) y el tiempo de viaje.

Finalmente, en los capítulos 5 y 6 se presentan, respectivamente, las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

1. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen brevemente aspectos generales del Sistema para el Desarrollo y Gestión de Carreteras (*Highway Development and Management System*), conocido por las siglas HDM. También se describen las principales características del modelo de efectos sobre los usuarios de las carreteras, RUE, (Road User Effects), desarrolladas por diferentes entidades internacionales.

El HDM es un modelo computacional que simula condiciones económicas y físicas de un proyecto vial a lo largo de un periodo de tiempo, para una serie de especificaciones y escenarios definidos por el analista.

El sistema HDM permite estimar el estado de carreteras y costos de mantenimiento y operación; el modelo también hace comparaciones para evaluaciones técnicas y económicas para diferentes alternativas de construcción, conservación y mejoramiento, incluyendo diversas alternativas a lo largo del tiempo, para un proyecto específico de una carretera o de una red completa según se requiera. El HDM estima para cada año del periodo en estudio los costos totales del proyecto para todas las alternativas de diseño y de conservación propuestas por el evaluador; en los análisis utiliza diferentes tasas de interés para que el evaluador pueda elegir la alternativa que estime más conveniente según los criterios en consideración. Los costos se analizan en tres grupos que se interrelacionan de manera conjunta en el tiempo: construcción, conservación o mantenimiento, y costos de operación o de uso de la carretera; estos costos se determinan previendo las cantidades físicas de consumo de cada recurso, que luego se multiplican por los costos o precios unitarios. (Chang y Meléndez, 2001)

El enfoque general de HDM consiste en que el analista define una serie de alternativas que describen las diferentes opciones de inversión en construcción, mejora y conservación para la carretera. Las inversiones, reflejadas en las actividades a ejecutar en la carretera, son determinantes en la condición del pavimento a lo largo del tiempo y en los costos futuros de la conservación. Para realizar un trabajo integral, HDM-4 contiene una serie de submodelos que se ajustan a diferentes aspectos de análisis; cada submodelo requiere ciertos datos de entrada y produce sus propios resultados o datos de salida. Para aplicar el modelo correctamente, es necesario asegurar que los datos de entrada sean apropiados y que estos mismos datos hayan sido convenientemente calibrados, (ISOHDM, 2000c).

Dentro del sistema HDM, el modelo RUE determina los efectos que el pavimento y el tránsito tienen en los usuarios de la carretera. El modelo objeto de estudio y análisis de esta tesis, RUE, pronostica las velocidades del tránsito y los consumos de los componentes que hacen parte del modelo (combustible, neumáticos, etc.); multiplicando estos componentes individualmente por sus costos unitarios se obtiene el valor de los efectos del estado de la carretera en los costos en que incurren los usuarios y la calidad del servicio que se les ofrece a lo largo del tiempo. Comparando los costos de las diferentes alternativas de inversión se obtiene una evaluación de tipo económico, y se pueden identificar de manera directa las diferencias en los costos y beneficios de las diferentes alternativas.

La aplicación de cualquier modelo y la calibración local debe ser cuidadosa. Se han observado diferencias significativas para los casos de los costos totales de operación vehicular COV (VOC, Vehicle Operation Costs, por sus siglas en inglés) y también en las contribuciones relativas de los diferentes componentes de tales costos, diferencias

que surgen cuando el HDM no está debidamente calibrado. Una inadecuada calibración local puede distorsionar estos costos y sus aplicaciones, por lo que se hace necesaria la calibración del modelo verificando los resultados obtenidos con el modelo y aquellos que se obtienen de observaciones en campo (Altamira et al, 2004).

1.1. DESARROLLO DEL ESTUDIO

El primer paso para producir un modelo de evaluación de proyectos de carreteras lo dio en 1968 el Banco Mundial. El primer modelo se produjo como respuesta a los términos de referencia para un Estudio de Diseño de Carreteras elaborado por el Banco Mundial en conjunto con el Laboratorio Británico de Investigación en Transporte y Caminos TRRL (Transport and Road Research Laboratory) y el Laboratorio Central Francés de Puentes y Carreteras LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Posteriormente, el Banco Mundial confió al Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT (Massachusetts Institute of Technology) la realización de un estudio a partir de bibliografía existente mediante la construcción de un modelo basado en la información disponible. El modelo resultante denominado Modelo de Costos de Carreteras -HCM (Highway Cost Model)– producido por el MIT (Moavenzadeh 1971, 1972) supuso un considerable avance sobre otros modelos utilizados para examinar las interacciones entre costos de las obras en carreteras y costos de operación de vehículos.

El sistema HCM resaltaba las áreas donde era necesaria una mayor investigación para proporcionar un modelo que fuese más adecuado para entornos de países en desarrollo, con relaciones adicionales específicas de ese entorno.

Como continuación de lo anterior, el TRRL en colaboración con el Banco Mundial, auspiciaron un importante estudio de campo en Kenia para investigar el deterioro de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que afectan los costos de operación de los vehículos para un país en desarrollo. Los resultados de este estudio fueron utilizados por TRRL para producir la primera versión prototipo del Modelo de Inversión en Transporte por Carretera RTIM (Road Transport Investment Model) para países en desarrollo (Abaynayaka, 1977). En 1976, el Banco Mundial financió nuevos desarrollos del HCM en el MIT que produjeron la primera versión del Modelo de Estándares de Diseño y Conservación de Carreteras (HDM, por sus siglas en inglés Highway Design and Maintenance Standards Model), al cual se hace referencia como la versión II del HDM (Harral, 1979).

Otros trabajos adicionales fueron realizados en diversos países para ampliar el ámbito geográfico de los modelos RTIM y HDM; dentro de estos estudios se pueden citar:

El Estudio Caribe (por TRRL): Investigó los efectos de la geometría de carreteras en los costos de operación de vehículos (Morosiuk and Abaynayaka, 1982; Hide, 1982).

Estudio India (por el Central Road Research Institute - CRRI): Estudió problemas operativos particulares de las carreteras de la India, en términos de caminos angostos y grandes proporciones de transporte no motorizado (CRRI, 1982).

Estudio Brasil (financiado por UNDP): Amplió la validez de todas las relaciones entre modelos (GEIPOT, 1982).

Los resultados de los estudios TRRL se usaron para desarrollar el modelo RTIM2 (Parsley and Robinson, 1982). mientras que el Banco Mundial desarrolló un modelo más completo que incorporó los hallazgos de todos los estudios anteriores y condujo a HDM-III (Watanatada et al, 1987). Ambos modelos fueron diseñados originalmente para operar en computadoras centrales y a medida que la tecnología informática fue avanzando, la Universidad de Birmingham (Kerali et al, 1985) produjo una versión para microordenadores del RTIM2 para TRRL. Posteriormente, el Banco Mundial produjo HDM-PC, una versión para microordenadores de HDM-III (Archondo-Callao y Purohit, 1989).

En los años siguientes se realizaron diversos estudios que proporcionaron nuevos conocimientos en relación con mecanismos de deterioro de carreteras, costos de operación vehicular, problemas de operación, efectos del diseño geométrico en los costos de operación, entre otros. Estos resultados se integraron en el desarrollo de HDM III, el cual concluyó en 1989.

A mediados de los noventa, se hizo evidente la necesidad de nuevos esfuerzos orientados a la modernización del modelo, a fin de incorporar herramientas informáticas modernas, aumentar sus posibilidades de análisis e incorporar los resultados de diversas investigaciones realizadas en varios países. En el caso de los costos de operación de vehículos, se reconocía que la tecnología de estos había mejorado mucho desde 1980, por lo cual los costos típicos de operación podrían ser bastante menores que los obtenidos en las predicciones de HDM-III. Por otra parte, aunque el modelo se había utilizado principalmente en países en desarrollo, se identificó un uso significativo por parte de naciones industrializadas, lo cual se tradujo en la necesidad de incorporar nuevos submodelos para analizar los efectos del congestionamiento vehicular y de los climas fríos, un mayor número de tipos de pavimento, así como aspectos de seguridad y medio ambiente.

Se siguieron desarrollando ambos modelos y TRRL produjo RTIM3 en 1993 para ofrecer una versión del software fácil de usar, en forma de hoja de cálculo (Cundill y Withnall, 1995), y en 1994, el Banco Mundial produjo dos versiones más de HDM:

HDM-Q: Incorporaba los efectos de la congestión del tránsito en el programa HDM-III (Hoban, 1987).

HDM Manager: Proporcionaba una interfaz de usuario a HDM-III (Archondo-Callao, 1994).

Finalmente, en 1997 se inició el Estudio Internacional del Desarrollo y Gestión de Carreteras ISOHDM (International Study of Highway Development and Management). Como principal resultado del mismo, en el año 2000 se anunció la terminación del sistema HDM-4. Aunque se conservaron las siglas para identificar a las ediciones previas, el nuevo producto fue denominado Sistema de Gestión y Desarrollo de Carreteras (Highway Development and Management System), tomando el nombre del estudio que le dio origen.

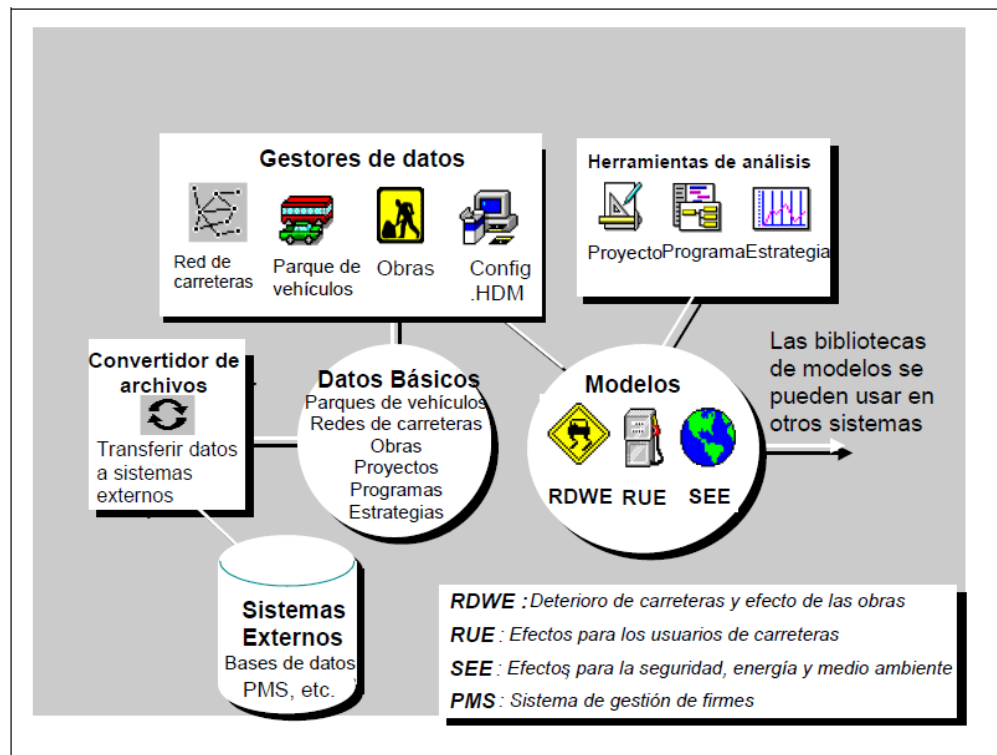
1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y SUS MODELOS

El sistema HDM es un modelo computacional que permite evaluar técnica y económicamente las políticas de inversión, conservación y operación de carreteras, por

medio de la simulación del desempeño de los vehículos y del deterioro de la estructura de la carretera durante un período de tiempo determinado.

El HDM-4 (Highway Development Management Tool) se basa en el concepto del análisis del ciclo de vida del pavimento, el cual se aplica para estimar el deterioro de la carretera, efectos de las obras de reparación, efectos para usuarios de la carretera y efectos socioeconómicos y medioambientales, a lo largo del periodo de vida de la carretera. La estructura general del sistema HDM-4 se presenta en la Figura 1.1.

Figura 1.1 Estructura del sistema HDM-4



Fuente: (Odoki et al, 2000)

Para su funcionamiento, el modelo requiere de información sobre las características de las carreteras a analizar, las características de los vehículos que operan en la red, los estándares de conservación que serán aplicados en los distintos tramos de carretera, y los datos predefinidos que se utilizarán en el análisis. Todo esto incluido como información en una unidad gestora de datos que posee cuatro componentes: red de carreteras, parque de vehículos, trabajos y configuración de HDM.

El sistema HDM-4 cuenta con tres herramientas de análisis que tienen como propósito evaluar proyectos, programas y estrategias de conservación y mejoramiento de carreteras. Las tres basan su análisis en el ciclo de vida de la carretera. Entre los componentes de la Figura 1.1 se observan cuatro grupos de modelos correspondientes a los modelos internos del sistema; según Solminihaç (2005) estos cuatro grupos de modelos son:

- RD: Modelo de Deterioro (Road Deterioration); predice el deterioro del pavimento, para estructuras asfálticas, en concreto hidráulico y vías no pavimentadas.

- WE: Modelo de Efectos de Intervenciones (Works Effects); simula los efectos que tienen los trabajos de conservación de la carretera en la condición del pavimento y determina los costos correspondientes.
- RUE: Modelo de Efectos sobre los Usuarios de las Carreteras; determina los costos de operación del vehículo, accidentes en la carretera y tiempo de viaje.
- SEE: Modelo de Efectos Sociales y Ambientales (Social and Environmental Effects); determina los efectos de emisiones del vehículo y consumo de energía.

Respecto de HDM-III, el sistema HDM-4 cubre un rango más amplio de tipos de pavimentos flexibles e introduce los pavimentos rígidos. Por otra parte, aumentan los factores de calibración de 7 en HDM-III a 21 en HDM-4. Esto último, si bien hace más flexibles los modelos, puede crear dificultades para su calibración y puede producir errores agregados en la predicción.

Los modelos de deterioro y efectos de las obras RDWE (Road Deterioration and Works Effects), permiten predecir para un periodo de análisis definido por el usuario, la evolución del estado físico de las carreteras en función de las solicitaciones impuestas por el tránsito, las condiciones climatológicas y el tipo de pavimento; asimismo, los modelos estiman los efectos del estado de la carretera y las obras de conservación y mejoramiento más usuales. Los principales deterioros que tiene en cuenta el modelo son agrietamiento, pérdida de agregados, ahuellamiento, regularidad superficial, baches, fallas de borde, textura superficial y resistencia al deslizamiento.

Los modelos de efectos sobre los usuarios de la carretera RUE (Road User Effects), objeto de este estudio, son utilizados para calcular los efectos del estado físico y las condiciones de operación de las carreteras sobre los usuarios de las mismas, en términos de indicadores como costos de operación vehicular (COV), costos por tiempos de viaje y costos de accidentalidad. Los resultados de los modelos se utilizan para determinar los beneficios derivados de las inversiones en proyectos viales.

Finalmente, los modelos de efectos sociales y ambientales SEE (Social and Environmental Effects), están conformados por dos tipos de análisis: el balance energético y el balance de emisiones de vehículos, los cuales permiten hacer una evaluación de los impactos sociales y ambientales.

Además, HDM-4 permite interactuar con sistemas externos como bases de datos con información de redes de carreteras o sistemas de gestión de pavimentos a través de archivos de importación y/o exportación.

1.3. CALIBRACIÓN

Debe tenerse en cuenta que los modelos en que se fundamenta el programa han sido desarrollados en países con condiciones tecnológicas, medioambientales y económicas muy concretas. Por esto para su utilización será necesario la adaptación de dichos modelos a las circunstancias particulares de cada país. La fiabilidad de los resultados dependerá por tanto de dos aspectos. Por un lado, la entrada de datos, es decir la correcta interpretación de los datos necesarios para llevar a cabo el análisis y el ajuste de los mismos a las condiciones reales de partida. Por otra parte, habrá que evaluar si los resultados se corresponden con el comportamiento real observado.

El objetivo de la calibración es obtener modelos de predicción ajustados, que ofrezcan estimaciones más realistas y confiables, y que permitan establecer planes de conservación que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar el costo total de operación de la carretera a nivel local o regional (costo total = costo de operación vehicular + costo de conservación + costo exógeno).

1.3.1. Generalidades. El modelo RUE del sistema HDM contiene un amplio número de parámetros que pueden ser calibrados y ajustados. El sistema HDM-4 tiene mayor cantidad de factores de calibración respecto al sistema HDM-III; esto se debe a que muchos valores inalterables para parámetros y variables que fueron altamente codificados en el código fuente del sistema HDM-III, pueden ser ahora modificados en el sistema HDM-4.

El grado apropiado de la calibración local en HDM es una elección que depende mucho del tipo de aplicación y de los recursos disponibles por parte del usuario. Por ejemplo, en la planificación de aplicaciones de magnitud absoluta de RUE y de los costos de construcción de la carretera se necesita ajustar al máximo los costos locales, ya que las alternativas de proyectos con diferentes longitudes o capacidades de tránsito se evalúan mediante la comparación de los costos totales del transporte en la carretera. Por otro lado, en la programación de los trabajos de conservación es muy importante la sensibilidad de RUE para determinar las condiciones de la carretera, particularmente para las proyecciones de la regularidad superficial y los deterioros; a partir de esto el sistema proyecta los mantenimientos necesarios.

Según la guía de calibración y adaptación de HDM-4 (2002), existen tres niveles de calibración para el sistema: nivel bajo, nivel moderado y nivel alto; estos niveles hacen referencia al esfuerzo y recursos necesarios. En términos generales, cada nivel tiene el siguiente alcance:

- Nivel 1 – Aplicación básica: Determina parámetros básicos requeridos, adoptando muchos valores predefinidos y calibrando los parámetros más sensibles con estimaciones a partir de estudios teóricos o con mínimas encuestas de campo.
- Nivel 2 – Calibración: Requiere la medición de parámetros adicionales y de encuestas de campo más avanzadas para calibrar las relaciones más importantes pronosticadas para las condiciones locales. Este nivel puede producir ligeras modificaciones del código fuente del modelo.
- Nivel 3 – Adaptación: Utiliza mayores encuestas de campo y experimentos controlados para mejorar las relaciones existentes o para desarrollar nuevas relaciones locales específicas que sustituyen al código fuente del modelo.

En términos de esfuerzo, para estos tres niveles de calibración se pueden emplear semanas, meses y años. Un analista debería poder realizar una calibración de nivel 1 en, aproximadamente, una semana. Para la calibración de nivel 2 se requiere una cantidad mayor de esfuerzo y debería tomar, aproximadamente, un mes. Las calibraciones de nivel 3 requieren un período largo de recolección de datos básicos, por lo que su realización podría durar un año o más.

Para el caso específico del modelo RUE, tema de esta tesis, en la Tabla 1.1. se relaciona los parámetros asociados a los factores de calibración; en este estudio se trabajarán los parámetros correspondientes a los niveles 1 y 2 de calibración.

Tabla 1.1 Parámetros del modelo RUE y sus niveles de calibración en HDM-4

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	NIVELES DE CALIBRACIÓN		
		NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Coefficiente de fuerza aerodinámica		•		
Multiplicador del coeficiente de fuerza aerodinámica		•		
Promedio anual de utilización	km/año	•		
Promedio de vida útil	años	•		
Nº básico de recauchutados – NR0		•		
Velocidad deseada	m/s	•		
Velocidad del motor – a0		•		
Velocidad del motor – a1		•		
Velocidad del motor – a2		•		
Velocidad del motor – a3		•		
Velocidad del motor - ralenti		•		
Estándar de ejes equivalentes	ESA/veh	•		
Horas conducidas	h/año	•		
Número de ejes		•		
Número de ruedas		•		
Tara	t	•		
Parámetros de depreciación de vida óptima		•		
Parámetros de depreciación de vida óptima		•		
Porcentaje de uso privado	%	•		
Fuerza de frenado	kW	•		
Fuerza de conducción	kW	•		
Fuerza especificada	kW	•		
Área frontal proyectada	m ²	•		
Trayecto en carreteras con agua	%	•		
Trayecto en carreteras con nieve	%	•		
Tipo de neumático		•		
Método de utilización		•		
Volumen desgastable de goma	dm ³	•		
Diámetro de la rueda	m	•		
Ruido de aceleración – ruido máximo del perfilado			•	
Ruido de aceleración – ruido máximo del conductor			•	
Ruido de aceleración – ruido máximo de TNM			•	
Ruido de aceleración – ruido máximo	m/s ²		•	
Ruido de aceleración – ruido máximo de regularidad			•	
Ruido de aceleración – ruido del tráfico a1			•	
Ruido de aceleración –ruido del tráfico a0			•	
Combustible-factor de eficiencia de la potencia	ml/kW/s		•	
Combustible – tasa a ralenti	ml/s		•	
Rotación del modelo de hora de trabajo – K0lh			•	
Translación del modelo de hora de trabajo – K1lh			•	
Pérdida de lubricante por la contaminación	l/1000 km		•	
Pérdida de lubricante por la circulación			•	
Rotación del modelo de repuestos - K0pc			•	
Translación del modelo de repuestos - K1pc			•	

Tabla 1.1 (Continuación)

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	NIVELES DE CALIBRACIÓN		
		NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Relación capacidad-velocidad - nivel de interacción de baja capacidad - Qo	pcse/h		•	
Relación capacidad-velocidad – capacidad nominal - Qnom	pcse/h		•	
Relación capacidad-velocidad – velocidad a capacidad nominal	km/h		•	
Relación capacidad-velocidad – velocidad a máxima capacidad	km/h		•	
Relación capacidad-velocidad – capacidad máxima -	pcse/h		•	
Relación capacidad-velocidad – factores de equivalencia del vehículo	pcse/veh		•	
Factor de cumplimiento del límite de velocidad			•	
Velocidad de regularidad - a0			•	
Velocidad de regularidad – velocidad rectificada máxima	mm/s		•	
Factor crítico de ancho de velocidad CW1			•	
Factor crítico de ancho de velocidad CW2			•	
Factor del ancho de velocidad deseada - a1			•	
Factor del ancho de velocidad deseada – a2			•	
Eficiencia del arrastre				•
Constante del modelo de hora de trabajo				•
Coefficiente de repuestos del modelo de hora de				•
Factor de congestión del modelo de repuesto				•
Constante del modelo de repuesto				•
Regularidad mínima del modelo de repuesto				•
Regularidad del modelo de repuesto				•
Edad término del modelo de repuesto - kp				•
Exponente de regularidad del modelo de repuesto				•
Curva de la regularidad de los repuestos				•
Potencia – potencia de los accesorios del motor - Kpea				•
Potencia – potencia del motor - a0				•
Potencia – potencia del motor - a1				•
Potencia debida al arrastre del motor				•
Resistencia a la rodada - a0				•
Resistencia a la rodada - a1				•
Resistencia a la rodada - a2				•
Factor de resistencia a la rodada - Kcr2				•
Curva de velocidad - a0				•
Curva de velocidad - a1				•
Pendiente de la velocidad – longitud de la pendiente crítica - a0				•
Pendiente de la velocidad – longitud de la pendiente crítica – a1				•

Fuente: Elaboración propia con base en manuales HDM-4

Como se muestra en la Tabla 1.2, Curtayne et al. (1987), con relación al COV sugirieron un concepto relacionado con la jerarquía de calibración con niveles de aumento de actividad. Observaron que las actividades de calibración podían estar basadas en

fuentes primarias y secundarias para los datos. Las fuentes primarias están basadas en las comparaciones directas entre los costos y las características de la carretera mientras que las fuentes secundarias proveen información sobre las condiciones económicas o de circulación de una región. La calibración de los resultados del COV varía entre una selección disponible de relaciones dentro de una base de pocos datos y la estimación de relaciones locales usando datos especialmente recopilados.

1.3.2. Nivel 1 – Aplicación. Para la ejecución de HDM-4 es necesario realizar al menos una calibración de nivel 1; esto se puede entender como ajuste de mejora del modelo. Una vez realizado, generalmente no es necesario repetirlo durante futuras aplicaciones en el mismo país ya que la mayoría de los datos y de los parámetros del modelo son relativamente estables a lo largo del tiempo.

Una calibración de nivel 1 está especialmente basada en las fuentes secundarias; es decir, en un estudio teórico. Por ejemplo, los parámetros de RUE se pueden evaluar usando los datos de fuentes como publicaciones del gobierno y la industria, organizaciones administrativas o diferentes informes de RUE basados en estudios anteriores.

A continuación, se presentan las fuentes de datos de calibración y jerarquía de los recursos de RUE dependiendo del tipo de dato, fuente de obtención y necesidades para mejorar la aplicabilidad.

Tabla 1.2 Fuentes de datos de calibración y jerarquía de los recursos de RUE

TIPO DE DATOS	FUENTES O NECESIDADES	AUMENTO REQUERIDO DE RECURSOS		
Secundario disponible	Publicaciones gubernamentales Informes técnicos industriales Informes de investigación sobre RUE Fabricantes Informes de consultores Organizaciones de operadores Inventarios de estados de carreteras	Elegir los informes de estudios primarios que correspondan a condiciones locales	Elegir grupos de datos y de vehículos Calibrar los modelos mecánicos para adaptarlos a los cambios tecnológicos	Examinar, identificar y definir los tipos de vehículos con los datos disponibles de costos y condición de la carretera
Calibración por sondeo	Investigación a pequeña escala, recogida de datos de costos de compañías que operen carreteras con diferentes características Personal con conocimiento en la industria Encuestas de tasas Clasificación de rutas	Confirmar e identificar los valores y evaluar las magnitudes de las caídas Determinar el uso de los vehículos por edad y condición de la carretera	Estimar los costos de los neumáticos y costos de depreciación Confirmar los valores de caída del costo total	Estimar nuevas relaciones locales, especialmente para costos de conservación Comparar los modelos RUE pronosticados con las tasas

Tabla 1.2 (Continuación)

TIPO DE DATOS	FUENTES O NECESIDADES	AUMENTO REQUERIDO DE RECURSOS		
Calibraciones experimentales	Investigación a pequeña escala del rendimiento del vehículo y de las características de la carretera Personal capacitado Capacidades analíticas	Calibración de la velocidad	Calibración del consumo de combustible	Estimación de nuevas relaciones, por ejemplo para resistencia al rodamiento y regularidad de la carretera

Fuente: Curtayne et al. (1987)

De acuerdo con los datos de factores de calibración del sistema HDM-4, los siguientes datos se deben determinar para ser usados en la calibración como un dato de entrada para el análisis de una calibración de Nivel 1:

- Los costos unitarios (RUE y RDWE),
- Ciertas características de los vehículos representativos,
- Datos del análisis económico (tasas de descuento y período de análisis),
- Características de los pavimentos (estudios RDWE),
- Composición y tasas de crecimiento del tránsito,
- Tipo de clima en la región

1.3.3. Nivel 2 – Calibración. Una calibración de nivel 2 usa directamente las medidas de las condiciones locales para verificar y ajustar la capacidad de pronóstico del modelo. Esta requiere un mayor grado de precisión en la recolección de datos en comparación con el nivel 1. Para RUE, por ejemplo, se concentra en la velocidad, el consumo de combustible, neumáticos y repuestos y en los costos fijos relacionados con la utilización y vida útil del vehículo.

En las calibraciones de nivel 2, se reúnen datos de entrada más detallados que en la calibración de nivel 1.

1.3.4. Nivel 3 – Adaptación. La calibración de nivel 3 incluye generalmente dos componentes:

- Recopilación mejorada de datos
- Investigación fundamental

Algunos datos se pueden estimar con cierta precisión usando períodos cortos, por ejemplo, la distribución horaria del volumen de tránsito, pero se obtiene una mayor precisión reuniendo datos de diferentes lugares en períodos largos (a partir de un estudio de volúmenes). Estos trabajos requieren un compromiso mayor de calidad, de investigación de campo bien estructurada y de análisis estadístico en períodos de varios años.

En esta tesis de maestría, la investigación se ocupa principalmente de la calibración para nivel 1 y nivel 2 del modelo de efectos de usuarios RUE para las condiciones locales, aplicado para el caso de vías en el Departamento de Boyacá.

1.4. ANTECEDENTES DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR COV

Los costos de operación de los vehículos COV, son los costos de circulación que incluyen el combustible, los neumáticos, el mantenimiento, las horas de trabajo, la depreciación, los intereses, los lubricantes, salarios de los conductores y el tiempo de carga y viaje; mientras que los efectos sobre los usuarios de la carretera (RUE), son los COV junto con la seguridad, las emisiones de los vehículos, el ruido y el balance de energía.

En particular, el sistema HDM-III desarrollado por el Banco Mundial se venía usando desde hace más de dos décadas para combinar la evaluación técnica y económica de proyectos, para preparar programas de inversión y analizar estrategias de redes de carreteras. El sistema HDM-III, entre otras, contiene las relaciones para predecir el efecto de las carreteras en los costos de operación vehicular (COV).

Las relaciones fundamentales contenidas en el sistema HDM-III se basan en investigaciones realizadas en varios países. Para los COV, el sistema HDM-III contiene cuatro conjuntos de relaciones de los estudios primarios realizados en Kenya (1971-1975), el Caribe (1977-1982), la India (1977-1983) y Brasil (1975-1984). Los datos para el desarrollo de las relaciones se recopilaron a partir de encuestas de costos de usuarios por medio de experimentos controlados. Otras relaciones para el deterioro de carreteras y para los efectos de mantenimiento (RDWE), se desarrollaron a partir de estudios realizados principalmente en Brasil, los cuales fueron ampliamente aplicados en varios países.

Se ha reconocido que hay limitaciones tanto para los COV como para los modelos RDWE en el sistema HDM-III. Por ejemplo:

- En los estudios de COV, el estudio del vehículo y la tecnología de los neumáticos son diferentes a los estudios de los vehículos modernos;
- Algunos componentes de los costos se modelan de una manera simplista;
- El sistema HDM-III no considera la congestión, los efectos ambientales o la seguridad del tránsito;
- Los modelos RDWE no abarcan todos los tipos de pavimento o los tratamientos de mantenimiento que se encuentran comúnmente en desarrollo o para países desarrollados;
- Los modelos RDWE no incluyen los pavimentos rígidos;
- El sistema HDM-III no considera los efectos de textura del pavimento.

La evidente mejora de la tecnología empleada en la industria automotriz, la existencia de diversos estudios que contribuyeron a conocer mejor el comportamiento de las obras de infraestructura a lo largo de su vida útil, así como los grandes avances en la capacidad de los medios de cómputo, permitieron que a mediados de los noventa se empezara a trabajar en una nueva versión del HDM. Esta nueva versión, habría de abarcar un espectro más amplio de efectos para los usuarios, incluyendo el congestionamiento de carreteras, climas fríos, una gama más amplia de tipos de pavimento, seguridad vial y efectos medioambientales.

De esta manera, en 1997 se inició el Estudio Internacional del Desarrollo y Gestión de Carreteras (ISOHDM, por las siglas en inglés de International Study of Highway Development and Management) para generar un avance más amplio en el ámbito de los COV en cuanto a sus limitaciones, y con el fin de desarrollar modelos mejorados tanto para los COV como para RDWE. En este desarrollo participaron organizaciones de diversos países; en febrero de 2000 se anunció la terminación de la versión 1.0 del HDM-4. El ámbito del sistema HDM-4 se amplió considerablemente, superando las evaluaciones tradicionales de los proyectos y de esta manera se convirtió en un potente sistema para el análisis de gestión de carreteras y de alternativas de inversión.

1.4.1. El estudio ISOHDM. El Estudio Internacional de Desarrollo y Gestión de Carreteras, ISOHDM, fue realizado para ampliar el ámbito del sistema HDM-III y para conformar los sistemas de gestión de carreteras con herramientas de software adaptables que se acercaran a las necesidades de las agencias viales.

El estudio ISOHDM se desarrolló bajo el auspicio de importantes instituciones internacionales, además de contar con el apoyo de gobiernos nacionales y de otras organizaciones, pudiéndose mencionar el Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido, el Banco Mundial, el Banco Asiático de Desarrollo y la Administración Nacional de Caminos de Suecia. Contribuyeron además la Administración Nacional de Caminos de Finlandia, los Gobiernos de Malasia, Francia, Sudáfrica y Japón. El estudio estuvo coordinado por la Asociación Mundial de Carreteras y la Universidad de Birmingham.

El objetivo del estudio fue producir herramientas mejoradas para el desarrollo de estrategias económicas y técnicas en el sector de las carreteras. En el estudio se tuvo la perspectiva de que los resultados sean utilizados para “la planificación, presupuesto, seguimiento y gestión de los sistemas de carreteras”.

La versión 1.3 del HDM-4 lanzada en enero de 2002, utilizada en esta tesis de maestría, incorpora un número importante de mejoras y correcciones, aunque no difiere significativamente de la versión original.

Por su parte, la versión 2.0 lanzada en junio de 2005 incluye mejoras en rubros como herramientas para realizar análisis de sensibilidad, análisis para diferentes escenarios de presupuestos y multicriterio, estimación de beneficios sociales y mejoras en la modelación de emisiones, entre otros.

A la fecha se encuentra vigente la versión 2.09 con fecha de lanzamiento en enero de 2015. Dentro de los temas más relevantes de la presente actualización del software está la introducción de modelos incrementales de deterioro para pavimentos rígidos, los cuales modelan mejor el comportamiento de los pavimentos de este tipo, en cualquier punto dentro de su ciclo de vida. Esta actualización ofrece información sobre los resultados obtenidos antes de su redacción final, además, el usuario puede alternativamente seguir utilizando los modelos absolutos que se utilizaban originalmente en HDM-4.

Aunque no fue factible el uso de la última versión para el desarrollo de esta tesis, se recomienda incorporar las mejoras señaladas en futuros análisis que se desarrollen en Colombia.

1.5. EFECTOS SOBRE USUARIOS DE LAS CARRETERAS

De acuerdo con Bein (1993), los efectos sobre los usuarios de las carreteras (RUE) se pueden agrupar en seis áreas generales:

- Costos de operación vehicular (COV)
- Tiempo de viaje motorizado
- Tránsito no motorizado
- Accidentes de tránsito
- Impactos ambientales
- Otros costos

Según Bein, se han desarrollado pocos estudios para la variable de costos de operación vehicular COV del sistema HDM-4, de los cuales han derivado las diferentes relaciones. Bein revisó los distintos modelos desarrollados para los COV y estableció por orden de importancia los siguientes estudios: HDM-III, modelo COV de la Fundación para la Investigación y Desarrollo de Texas (TRDF), módulo MicoBENCOST COV, módulo COBA COV, modelo VETO sueco, módulo NIMPAC VOC australiano, modelos de consumo de combustible de Australia (ARFCOM), modelo NZVOC de Nueva Zelanda y modelo CB-ROADS de Sudáfrica (CSIR).

Aunque estos modelos han sido desarrollados en diferentes países y han sido aplicados a condiciones locales, la mayoría de ellos se han incluido en investigaciones para los sistemas HDM-III y HDM-4.

1.5.1. Efectos sobre los usuarios de las carreteras en HDM-III. El sistema HDM-III contiene únicamente relaciones predictivas para los COV, por lo tanto, las demás variables contempladas dentro del modelo RUE se incluyeron como costos exógenos. Según Watanatada, et al. (1987), dentro del sistema HDM-III se incluyeron y se ajustaron los siguientes componentes de COV:

- Velocidad libre del vehículo y tiempo de viaje a flujo libre (sin congestión)
- Consumo de combustible
- Consumo y desgaste de neumáticos
- Consumo de aceite
- Consumo de partes
- Horas de trabajo
- Depreciación y costos de interés

Según Riley y Smith (1989), las relaciones del HDM-III predicen el consumo de recursos como una función de la geometría y condiciones de la carretera, pero no de capacidad. De esta manera, determinaron que el consumo de cada recurso se multiplica por el costo unitario de cada componente para obtener el costo total.

En el sistema HDM-III hay cuatro conjuntos de relaciones de COV desarrollados a partir de los estudios de costos en Kenia, el Caribe, India y Brasil. Según Bennett (1995), el estudio de Brasil fue el más extenso y los datos se analizaron por parte del Banco

Mundial para desarrollar la relación de variables dentro del sistema HDM-III. Por lo tanto, estas relaciones son las más ampliamente aplicadas en los estudios de HDM.

1.5.2. Efectos sobre los usuarios de las carreteras en HDM-4. El punto de partida para el modelo RUE dentro del sistema HDM-4 fue el modelo utilizado en el sistema HDM-III. A partir del estudio de ISOHDM (1993), se identificaron como prioridades para la investigación las siguientes áreas específicas:

- Actualización para el modelo de consumo de combustible con el fin de reflejar la tecnología mejorada de los vehículos modernos
- La consideración de los efectos de la congestión en el modelo RUE
- Revisión del modelo para las variables de depreciación, intereses y costo de capital
- La incorporación de los impactos de seguridad para el tránsito en el sistema HDM-4
- Cálculo de demoras y costos de operación de vehículos COV debido a la ejecución de obras en las carreteras
- Modelo de velocidad
- Modelo de emisiones de ruido.

Además de estas áreas, se incluyó por parte del equipo de investigación sueco el estudio del consumo de los neumáticos y las emisiones de los vehículos. Posteriormente, este estudio fue realizado por el equipo de investigación de Nueva Zelanda, el cual sirvió de base para el modelo definitivo de neumáticos incorporado en el sistema HDM-4. El equipo de investigación japonés tuvo la responsabilidad de desarrollar el modelo de tránsito no motorizado.

Archondo-Callao, et al. (1994) demostraron que no todos los componentes tienen un gran impacto en los costos totales y no han sido bien investigados. ISOHDM por su parte, no realizó algún estudio importante de campo para el modelo RUE. Desafortunadamente, no se han realizado suficientes estudios para las relaciones de COV y esto limita las posibilidades de mejoras en muchas áreas. En su lugar, Bein (1993) recopiló información para establecer el conjunto más adecuado para el sistema HDM-4; realizó una revisión de estas relaciones e identificó nueve principales modelos de COV aplicables para diferentes países, sin embargo, demostró que no todos son adecuados para desarrollar completamente un modelo de evaluación económica.

El área que ha recibido la mayor atención es el modelo de consumo de combustible, ante lo cual, los equipos de investigación de Australia, Sudáfrica y Suecia desarrollaron modelos propios de consumo de combustible. El área con menor investigación ha sido el modelo de mantenimiento de partes y costos de trabajo.

A pesar de que las nuevas investigaciones son relativamente limitadas, se ha podido ampliar el ámbito de la modelación del modelo RUE para el sistema HDM-4, con relación al sistema HDM-III. Se destaca para el modelo RUE en el sistema HDM-4 los modelos de efectos de la congestión, el transporte no motorizado, la seguridad y las emisiones de los vehículos.

1.6. AVANCES EN COLOMBIA

En Colombia se han hecho pocos avances en investigaciones para el desarrollo y calibración del modelo RUE, sin embargo, se han adelantado algunos estudios e informes relacionados con la calibración del modelo, que se mencionan a continuación.

1.6.1. Contrato de Consultoría No. IDU-BM-112 de 2009 entre el IDU y TNM LIMITED. En el marco del desarrollo del contrato de Consultoría No. IDU-BM-112, celebrado en 2009 entre el IDU y TNM LIMITED, se elaboró un informe ejecutivo que contiene un resumen general de la evaluación de costos de usuarios de acuerdo con las intervenciones que realiza el Instituto de Desarrollo Urbano en Bogotá. En el informe se presenta en detalle los datos de entrada de la flota vehicular, los costos de usuarios adaptados a las condiciones locales y los valores recomendados por defecto para la ciudad de Bogotá.

Como punto de partida para el desarrollo de la Consultoría, se investigó y se recopiló la información existente en el ámbito internacional relacionada con los costos de usuarios y modelos de evaluación económica de proyectos de infraestructura vial. Este estudio tuvo en cuenta dentro del modelo de efectos para los usuarios RUE, los costos de operación vehicular COV, efectos de emisiones, seguridad y tiempo empleado por los usuarios. Los costos para los usuarios según el estudio, se obtienen a partir de los resultados del RUE, al cual se le asignan valores monetarios.

Como el modelo RUE del sistema HDM-4 fue la base del estudio, se hizo necesario realizar un análisis detallado de las variables que se encuentran incluidas dentro del modelo RUE, iniciando con la definición de los datos básicos de entrada que el modelo tiene por defecto (ajustados a condiciones de Estados Unidos).

Se identificó que el modelo RUE cuenta con dos grupos principales de parámetros de datos de entrada:

- Características de la vía: estos parámetros hacen parte de la vía o corredor de análisis, entre ellos se destacan características geométricas (ancho, subidas y bajadas, pendiente, número de carriles, entre otros), características del tránsito (TPD por tipo de vehículo definido en el HDM-4, 5 períodos de flujo vehicular, capacidad máxima, capacidad nominal, efectos de tránsito no motorizado, efectos de obstáculos en la vía, entre otros) y características de velocidad (velocidad de embotellamiento, efectos de límite de velocidad, efectos de ruido de aceleración, entre otros)
- Características y calibración de la flota vehicular: se definieron parámetros como costos de vehículos nuevos, combustible, partes de vehículos, mantenimiento, gastos administrativos, kilómetros recorridos, horas trabajadas, vida útil del vehículo, peso operativo, definición de factores de regresión por tipo de vehículo relacionados con las restricciones por velocidad, entre otros.

En cuanto a la metodología aplicada para el desarrollo de la Consultoría, se recopiló y se analizó la información correspondiente a la flota vehicular de la ciudad de Bogotá, la normatividad aplicable, las características principales y en conjunto con el Instituto, se definieron los tipos de vehículos a ser analizados. Con la flota vehicular definida, se estableció el vehículo tipo característico de cada grupo a partir de la información de los vehículos más vendidos en la ciudad; a partir de esta información se definieron las

características de la flota vehicular bogotana y los datos de entrada necesarios para la calibración de esta variable.

Posteriormente, en conjunto con el IDU se definieron los corredores a ser incluidos en el estudio de manera tal que abarcaran diferentes tipos de vías en la ciudad, estableciendo parámetros de agrupación: tipo de calzada, tipo de vía, presencia de intersecciones, importancia de la vía, entre otros. De cada corredor se recopiló la información básica en cuanto a características geométricas, TPD y velocidades definidas en estudios previos desarrollados por diferentes entidades distritales. De esta manera se almacenó toda la información en una base de datos.

Finalmente, para la definición de los datos de entrada necesarios para la aplicación de las ecuaciones del sistema HDM-4, se realizó el análisis de la flota vehicular de la ciudad y se definieron los tipos de vehículos y niveles jerárquicos aplicables para calibrar el modelo de costos en el sistema HDM-4.

1.6.2. Costos de operación vehicular INVIAS. El Instituto Nacional de Vías, INVIAS, dentro de los documentos técnicos disponibles para los usuarios, incluye una cartilla virtual de volúmenes de tránsito y costos de operación vehicular para el año 2016, los cuales son calculados con base en el sistema HDM-4. En la guía virtual para estos costos de operación, se indica que el sistema HDM-4 calcula internamente las velocidades y los costos de operación de los diferentes vehículos que deben cubrir los usuarios de las vías, así como también los deterioros y los costos de conservación de las mismas, en función del diseño de la vía, de las normas de conservación, de volumen de tráfico, de las cargas por eje y de las condiciones ambientales.

Para los costos de operación vehicular se encuentran los resultados detallados a través de diferentes Tablas resumen, donde se indican los costos asociados para cada tipo de vehículo según el tipo de terreno. Teniendo en cuenta que el asistente del INVIAS se encuentra de manera virtual en la red, el asistente virtual permite realizar las comparaciones con resultados obtenidos de estudios en cuanto a la planificación vial, incluyendo la evaluación técnico – económica de diferentes modos de transporte relacionadas con las obras de conservación, nuevos proyectos, justificación de presupuestos y fijación de prioridades.

Teniendo en cuenta que el INVIAS realiza el cálculo de los costos de operación vehicular mediante el uso de tres variables: a) Los vehículos representativos en la región tanto para el transporte de carga como de pasajeros; b) Las características de la vía para la condición “sin proyecto” y “con proyecto” y c) Los costos de operación de los vehículos, tanto en términos económicos como financieros, calculados para años anteriores utilizando el HDM-4, únicamente aplicable a los vehículos representativos y de acuerdo con las características de las vías, es adecuado utilizar estos valores como referencia para todo el territorio nacional, sin embargo, para una aproximación real a condiciones locales, es necesario realizar la actualización de la estructura de costos de operación vehicular mediante la recolección de datos en las diferentes regiones con el fin de calibrar de manera apropiada todas las variables consideradas en el modelo HDM-4, las cuales varían dependientes las condiciones de cada lugar.

1.7. SÍNTESIS

Los primeros programas han sido mejoras a las primeras aplicaciones en cuestión de costos y mantenimiento de caminos y carreteras, desarrolladas a principios de los años sesenta en Estados Unidos y en Gran Bretaña, como lo fue el pionero HDM. Los anteriores programas servían como herramientas para predecir el comportamiento de los pavimentos en el futuro y el consecuente gasto necesario para su conservación. Por lo tanto, se deduce que HDM-4 no es un modelo totalmente nuevo, sino que utiliza varias de las características de sus predecesores e incorpora una variedad más amplia de condiciones con nuevas aplicaciones de software mucho más potentes.

La utilización de HDM-4 se hace conveniente principalmente por las siguientes razones:

- La aparición de nuevas condiciones tanto en materia económica como técnica y la necesidad de incluir más factores que antes no se tomaban en cuenta (factores climáticos, medioambientales, seguridad vial, efectos de la congestión de tránsito, entre otros).
- La necesidad de jerarquizar las inversiones en proyectos de carreteras, realizando una optimización de los recursos disponibles y previendo la influencia de condiciones futuras en su estado.
- Desarrollar una visión más amplia de la Gestión de Carreteras considerando funciones como: Planificación, Programación, Preparación y Operaciones.

Los parámetros utilizados bajo la variable RUE (efectos sobre los usuarios de las carreteras) incluyen modelos para estimar los costos de operación vehicular COV, el tiempo de viaje y los accidentes. El desarrollo de estos modelos se ha extendido por las últimas tres décadas desde el Modelo de Costos de Carreteras (Moavenzadeh, 1971) para el sistema HDM-4, y durante este período el nivel de formulación para estos modelos ha avanzado a partir de otros modelos de regresión empírica desarrollados con datos recolectados de lugares específicos hasta llegar a modelos empíricos mecanicistas estructurales, constituidos mediante un avanzado análisis estadístico utilizando datos reales obtenidos de las condiciones de la carretera.

Aun así, el estudio del sistema HDM-4 identifica que a pesar de que los experimentos de campo abarcaron una amplia gama de condiciones y teniendo en cuenta que la tecnología se aplicó en el desarrollo del modelo, se mantuvieron algunos factores que no se podían introducir porque no se han ajustado o debido a que sus efectos no se pudieron determinar dentro de los rangos observados.

Esta tesis de maestría, se centrará en el desarrollo y análisis de los parámetros relacionados con la calibración del modelo efectos sobre los usuarios de las carreteras RUE a partir de los componentes de velocidad, consumo de combustible, consumo de partes, horas de trabajo, depreciación, intereses, gastos generales, demoras y costos de operación vehicular con sus efectos sobre los usuarios, debido a las obras de la carretera, seguridad, ruido, condiciones geométricas de la vía y aspectos relacionados con el estado del pavimento.

Durante el desarrollo de la investigación, cada componente se describirá en los diferentes capítulos y se abordarán aquellos componentes, datos y parámetros del modelo de efectos sobre usuarios de las carreteras RUE para los niveles 1 y 2 de

calibración en los que se deberán establecer valores locales en lugar de los valores predefinidos por el sistema HDM-4.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EFECTOS SOBRE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS

Como parte integral de HDM-4, el modelo Efectos sobre los Usuarios de las Carreteras, RUE hace uso de cálculos elaborados en otros módulos, además de requerir información específica para este módulo. A continuación, se describen sus principales características.

2.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS PROYECTOS DE CARRETERAS

El propósito principal de la evaluación es seleccionar proyectos con grandes beneficios económicos y a su vez determinar la cantidad de recursos a ser invertida y los beneficios económicos que se espera obtener. La cuantía de la inversión se determina por los costos de construcción y conservación anual. Los beneficios esperados por los usuarios se relacionan con los ahorros sobre los que los mismos obtendrán, al transitar por una mejor vía. Estos tres costos constituyen lo que comúnmente se denomina costo total del transporte (en carreteras) o costo de ciclo de vida completo.

Los objetivos principales de la evaluación de la inversión en una carretera se pueden identificar, por lo tanto, de la siguiente manera:

- Determinar el tamaño apropiado de la inversión y los beneficios esperados a partir de la misma.
- Determinar los estándares de diseño geométrico y estructural apropiados para el tamaño de la inversión con la intención de obtener los beneficios esperados.
- Determinar las prioridades relativas de la inversión entre los diferentes posibles proyectos cuando existe un presupuesto restringido.
- Evaluar los impactos económicos y socioeconómicos de la inversión, tales como las mejoras a las comunidades industrial, agrícola, educativa y de servicios de salud.

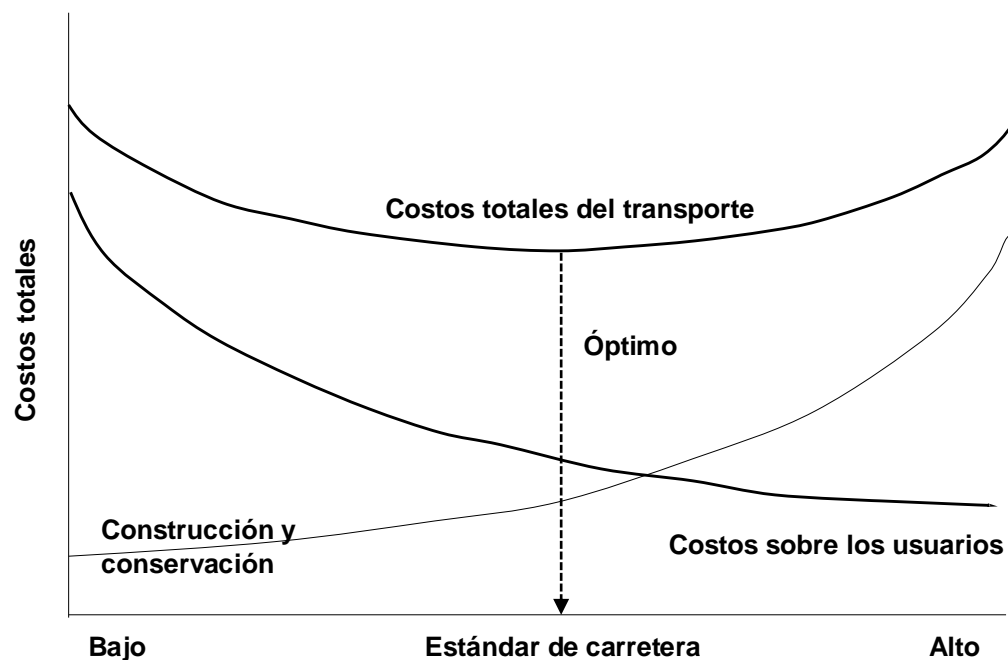
La evaluación de los beneficios socioeconómicos de una inversión de carreteras es difícil de realizar en términos monetarios. Es por eso que esta evaluación se hace separadamente después de que se haya realizado la evaluación económica, usando un modelo de evaluación de inversión.

La función principal de un modelo de evaluación de inversión es calcular los costos de la construcción, conservación y costos sobre los usuarios de la carretera en un periodo de análisis específico. Esto se logra modelando las interrelaciones entre el medioambiente, los estándares de construcción, conservación y geométricos, y los costos sobre los usuarios de la carretera.

Un modelo de evaluación de inversión puede ser usado para ayudar en la selección del diseño y de los estándares de mantenimiento apropiados que disminuyan los costos totales del transporte. El efecto de proveer mejores estándares en los componentes del costo total del transporte se ilustra en la Figura 2.1. Si se construye una carretera con bajos estándares, será necesario un gran esfuerzo de conservación, lo que resultará en un alto costo total de transporte a pesar de su bajo costo de construcción. Por el

contrario, si se utilizan estándares altos en la construcción de la carretera, los mismos serán mayores que los de conservación y los del usuario de la carretera. Un modelo de evaluación de inversión puede ser utilizado para seleccionar el diseño o el estándar de mantenimiento para los cuales sea mínimo el costo total de transporte. Esta alternativa se representa por una línea vertical entrecortada en la Figura 2.1. No obstante, la interacción entre los componentes del costo del transporte es más compleja de lo sugerido en la Figura 2.1. Una construcción de alto costo, como por ejemplo la construcción de una carretera muy amplia pero estructuralmente débil, no resulta necesariamente en bajos costos para los usuarios.

Figura 2.1 Análisis de costos ciclo de vida para proyectos de carreteras en HDM-4



Fuente: Manuales de HDM-4

Cuando se planea invertir en el sector de carreteras, es necesario evaluar todos los costos asociados con el proyecto propuesto. Esto incluye costos de construcción, conservación y rehabilitación, costos sobre los usuarios y todos los otros costos o beneficios externos que puedan ser directamente atribuidos al proyecto. Es normal considerar tales costos o beneficios a través de un período de análisis, generalmente igual o mayor que el esperado para la vida útil de la carretera, lo que define el término análisis de costos de "ciclo de vida". Los costos de construcción, rutinarios y de conservación periódica se originan generalmente por la agencia o administración a cargo de la red de carretera. De otra forma, los costos sobre el usuario de la carretera se originan en forma de costos de circulación vehicular, costos del tiempo de proyecto, costos de accidentes y otros costos indirectos.

Un modelo de inversión de carreteras simula la interacción entre estándares de construcción del pavimento, estándares de conservación y los efectos del medio ambiente, y la carga del tránsito para predecir la tendencia anual de la condición de la misma. Esto, junto con los estándares geométricos de la carretera, tiene un efecto directo sobre la velocidad de los vehículos, sobre los costos de la circulación y tasas de accidentes en la carretera.

2.1.1. Componentes del costo del transporte. La evaluación económica que se lleva a cabo en los modelos de inversión de carreteras, está basada en los flujos de costos anuales generados para la construcción, conservación y costos sobre el usuario. Los flujos de costos generalmente comienzan en un año específico, el cual puede ser el primer año de la construcción, el primer año de circulación o simplemente el año calendario. El número de años para el que se calculan los costos, depende del período de análisis especificado, generalmente igual al de la vida útil de la carretera.

2.1.1.1. Costos sobre los usuarios. Los costos sobre los usuarios se pueden definir como costos incurridos por los conductores de los vehículos y por el paso del tránsito general. Los cuatro tipos de costos sobre el usuario generalmente considerados, están asociados a la circulación de los vehículos, al tiempo de viaje, a los accidentes y a las incomodidades. Los dos últimos costos son difíciles de evaluar en términos monetarios, si bien los costos de accidentes se pueden estimar de diferentes formas de acuerdo con los contenidos de los recursos utilizados (por ejemplo, costo de repuestos y reemplazo de los mismos), o por las lesiones y muertes. Sin embargo, la carencia de métodos aceptables para la estimación de costos de accidentes e incomodidades en países en desarrollo, es la razón principal por la cual esos dos componentes no se incluyen en los modelos de evaluación de inversión existentes en países en desarrollo.

Para los costos relacionados con los accidentes (lesiones y muertes), se utilizará como referencia las cifras y estadísticas de aseguradoras incluidas en el libro de autos de diciembre de 2016, elaborado por Fasecolda, a través de encuestas de producción y siniestros, encuestas de vehículos hurtados y recuperados, y encuestas de responsabilidad civil. Este documento se elaboró con base en las respuestas de las compañías de seguros en la Encuesta Mensual del Ramo de Automóviles. La encuesta está constituida por las secciones 1. producción y siniestros, 2. vehículos hurtados y recuperados y 3. responsabilidad civil extracontractual. Así mismo, para cifras más actualizadas, se tendrán en cuenta algunas estadísticas de la Cámara de Industria Automotriz de la ANDI y de la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores, ANDEMOS.

Dentro de los costos sobre los usuarios se encuentran implícitos otros costos, como se explica a continuación.

- Costos de circulación

Se calculan por la suma de los componentes de los recursos utilizados, incluyen: consumo de combustibles y lubricantes, neumáticos y repuestos, costos de labores de mantenimiento del vehículo, salarios de los conductores y depreciación del vehículo con intereses de amortización.

Generalmente, se utilizan grupos separados de ecuaciones para los diferentes tipos de vehículos definidos por el usuario del software. Para cada tipo de vehículo, los modelos predicen velocidades promedio como una función de la geometría y la condición de la carretera. Los componentes de COV anteriores, con la excepción de la depreciación y los intereses, dependen en gran parte de la regularidad y de las características geométricas de la carretera. El consumo de los componentes de COV se predice en términos de los recursos. Por ejemplo, las ecuaciones del consumo de combustible calculan la cantidad del mismo utilizado en una distancia recorrida. Los costos unitarios de los diferentes recursos se especifican por el usuario del software, con la intención de calcular los costos totales anuales de la circulación. La depreciación se considera como una función del tiempo de viaje preestablecido y del nivel de utilización del vehículo.

- Costos del tiempo de viaje

Estos costos se calculan a partir del promedio de las velocidades, las distancias entre los viajes y los costos unitarios por hora de tiempo del usuario de la carretera. Las velocidades promedio son una función de la regularidad, del ancho, y del alineamiento vertical y horizontal de la carretera. Los valores que serán especificados como costos unitarios de tiempo para los usuarios de la carretera en países en desarrollo no son fácilmente demostrables, por lo que se recomienda que los proyectos en estos países deben ser estimados sin beneficios obtenidos a partir del ahorro de tiempo. Los beneficios del usuario de la carretera, derivados de los costos de ahorros en tiempo, en estos casos, pueden ser considerados como “excedentes del consumo” en adición a los ahorros en COV.

2.2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

Los elevados costos de las obras de infraestructura vial y la limitación de los presupuestos para ejecutarlos, han obligado a las administraciones viales a realizar estudios de costos y evaluaciones técnico económicas que permitan tomar decisiones acertadas en cuanto a la rentabilidad positiva de las inversiones. En general, el propósito es minimizar el costo total del transporte, incluidas la infraestructura y la operación vehicular, como base para determinar los planes y programas de rehabilitación y de mantenimiento de vías.

La evaluación económica constituye la parte final de toda una secuencia de análisis de factibilidad en los proyectos de inversión, en la cual se aplican métodos de evaluación económica que contemplan el valor del dinero a través del tiempo, con la finalidad de medir la eficiencia de la inversión total involucrada y su probable rendimiento durante su vida útil.

2.2.1. Alternativas de proyecto. Las carreteras se construyen normalmente con la intención de reducir costos y, por lo tanto, aumentar los beneficios producidos por la reducción de los costos sobre el usuario y por las mejoras de los servicios socioeconómicos. La evaluación económica de los proyectos de carreteras es una comparación de los componentes de los costos del transporte calculados para al menos dos alternativas de construcción identificadas una como alternativa Hacer lo mínimo o Sin proyecto y otra alternativa Hacer algo o Con proyecto.

- Alternativa “sin proyecto”

La alternativa **Hacer lo mínimo o Sin Proyecto** tiene como objetivo una reducción del costo del transporte. Usualmente, es la alternativa que requiere el mínimo aporte de capital, lo que representa la continuación del estándar de carretera que se está utilizando. Generalmente, la matriz del costo anual de una alternativa sin proyecto tendrá poco o ningún componente de costo de construcción, pero conllevará altos costos de conservación y costos sobre el usuario.

- Alternativa “con proyecto”

La selección de las alternativas de proyecto que serán analizadas depende de varios factores, en particular de los estándares nacionales de carreteras de proyectos anteriores, de los niveles del tráfico, de la disponibilidad de materiales, así como de otras

consideraciones políticas y socioeconómicas. Una alternativa con proyecto, generalmente requiere la aportación de un mayor estándar de carretera. Esto podría ser alcanzado por medio de una nueva construcción, de reconstrucción, de actualización o de mejoras al pavimento o a los estándares geométricos. Todos o cada uno de los anteriores pueden ser analizados como alternativas de proyecto independientes. Generalmente, la matriz de costos de estas alternativas hará variar los niveles de capital y los costos recurrentes, pero con un descenso de los costos sobre el usuario de la carretera.

2.3. DESCUENTOS

Es necesario descontar los costos del transporte en cada año de un periodo de análisis de su valor en el año base. Esto se hace para poder reflejar el valor del dinero en el tiempo, representado por el costo de oportunidad del capital invertido en un proyecto de carretera. El descuento se realiza multiplicando el costo en un año definido por el factor de descuento de ese año.

Los criterios más usados en la selección de proyectos son el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio/costo (B/C).

2.3.1. Valor presente neto (VPN). El VPN se define como la diferencia entre los costos y los beneficios descontados de un proyecto. En la evaluación económica de un proyecto de carreteras, los beneficios derivan principalmente, de los ahorros de los costos sobre el usuario y los de conservación (cuando existen).

2.3.2. Tasa interna de retorno (TIR). El VPN depende de la tasa de descuento usada en el cálculo de los valores actuales. Cuando se utilizan altas tasas de descuento, se obtiene un bajo VPN con valores negativos. La TIR de un proyecto se define como la tasa de descuento a la cual, el valor actual de los costos es igual al valor actual de los beneficios, es decir, cuando el VPN es cero. Los proyectos con valores de TIR altos son preferibles ya que ofrecen un VPN positivo con las tasas de descuento altas. En la mayoría de los casos, la TIR calculada debería ser mayor que la tasa de descuento examinada que se haya usado para evaluar proyectos financiados por el gobierno.

2.3.3. Relación beneficio/costo (B/C). La relación B/C provee una medida simple de la rentabilidad de un proyecto, es decir, la cantidad de beneficios obtenidos de cada peso invertido. Representa el índice sin medida que se obtiene dividiendo los beneficios calculados del proyecto entre los costos de capital descontados de la inversión.

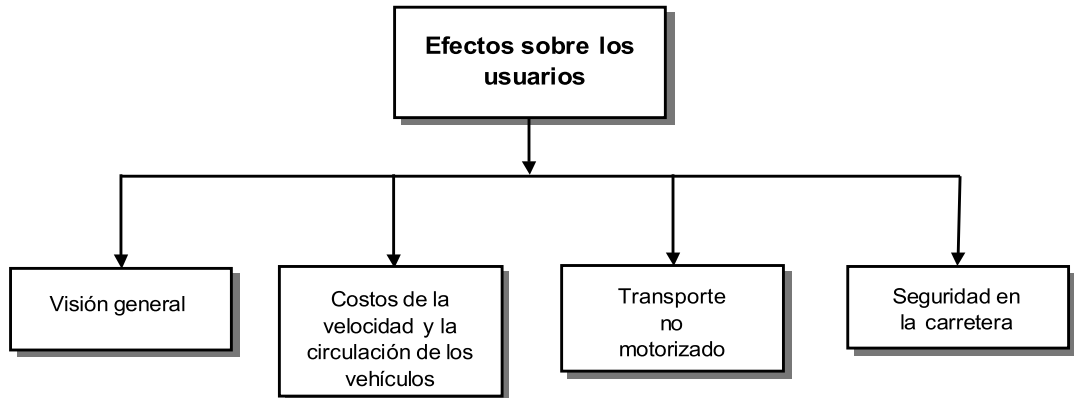
2.4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO RUE DEL HDM-4

La modelación de los efectos sobre los usuarios de las carreteras (RUE) en HDM-4 (ver Figura 2.2 Módulos de los efectos sobre los usuarios) comprende el siguiente análisis:

- Velocidad del vehículo motorizado (MT), costos de su circulación y tiempo de viaje (ver Figura 2.3)
- Velocidad del transporte no motorizado (NMT) y los costos de su circulación (ver Figura 2.4)

- Seguridad en la carretera

Figura 2.2 Módulos de los efectos sobre los usuarios



Fuente: Propia

A continuación, se ofrece una visión general del sistema de clasificación de vehículos en HDM-4, y se describen los diferentes componentes del modelo RUE considerados en HDM-4.

2.5. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS

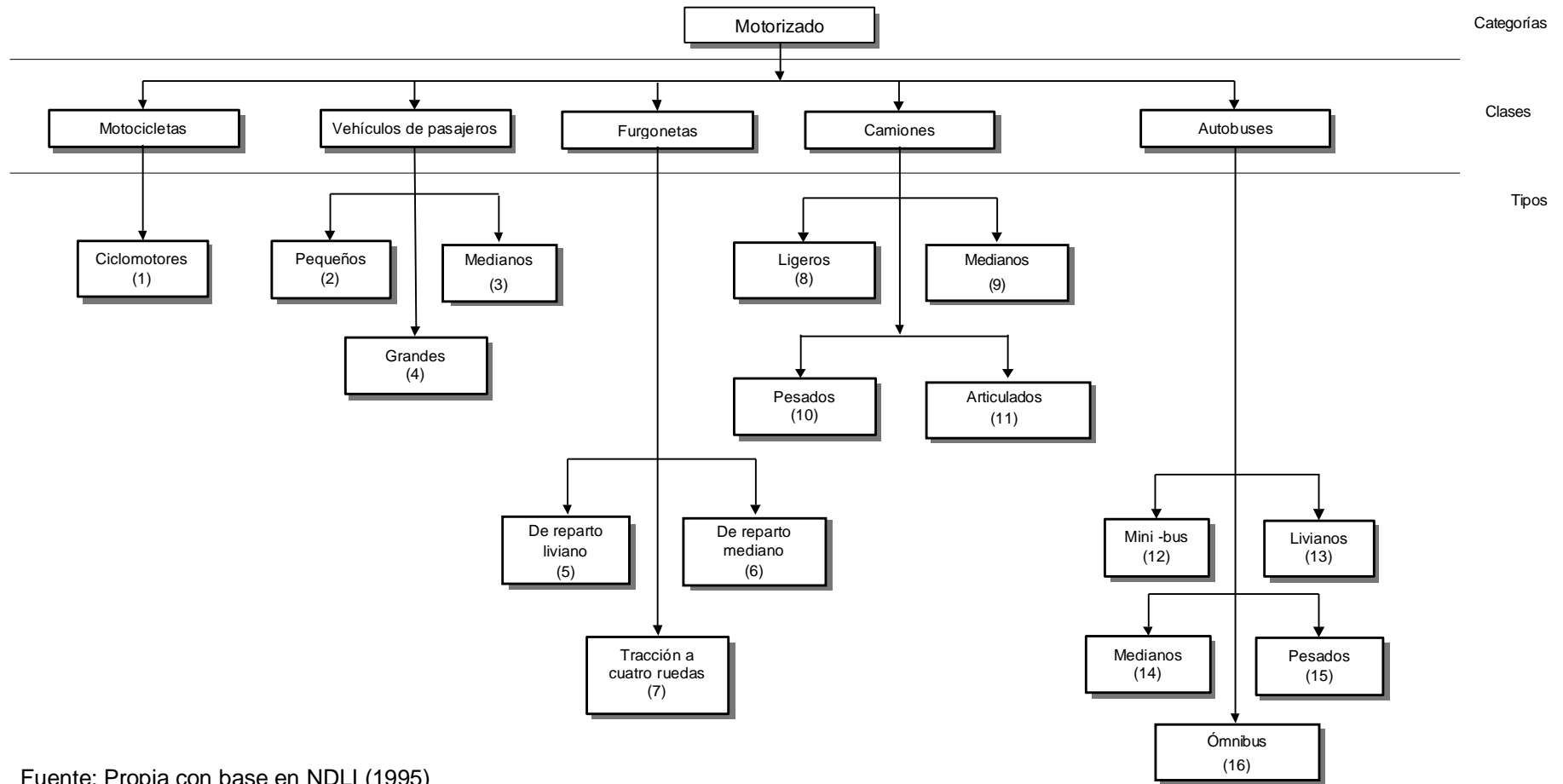
En el sistema HDM-4, los vehículos se dividen en categorías de motorizados y no motorizados, y cada categoría a su vez en clases de vehículos. Una clase comprende varios tipos de vehículos o vehículos representativos que el usuario puede especificar basándose en uno de los varios tipos de vehículos estándar. Esto permite cumplir las necesidades de los diferentes países y satisfacer todos los requerimientos analíticos del sistema.

Así, los vehículos se definen en una jerarquía de tres niveles:

- Categorías: Diferencia el transporte motorizado del no motorizado.
- Clases: Forma grupos de vehículos similares, por ejemplo, de pasajeros, camiones, etc.
- Tipos: Identifica tipos representativos de vehículos para los cuales se proveen grupos de relaciones de RUE.

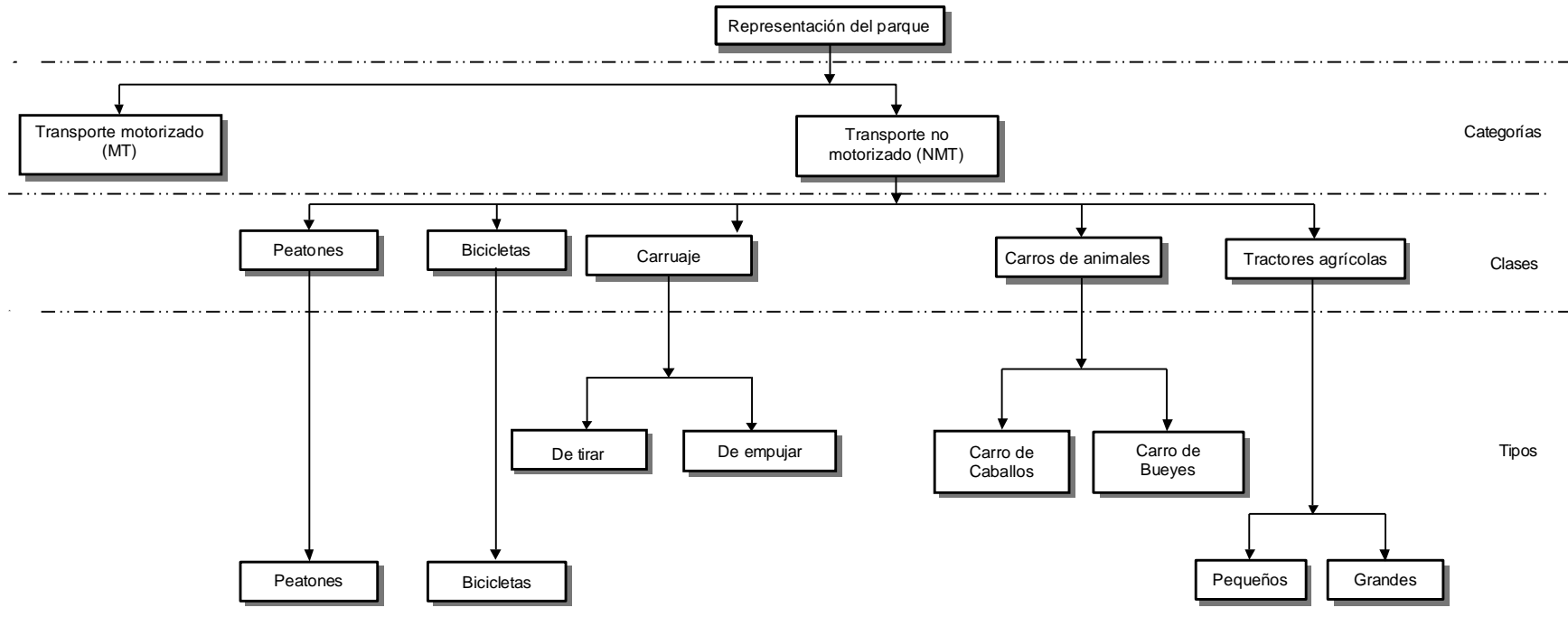
La Figura 2.3 muestra la representación jerárquica de los vehículos motorizados en categorías, clases y tipos. La Figura 2.4 muestra la misma jerarquía para la representación del transporte no motorizado. El sistema general de clasificación de los vehículos para el Departamento de Boyacá, y que hace parte de este proyecto, se explica detalladamente en el siguiente capítulo.

Figura 2.3 Definición de categorías, clases y tipos de vehículos motorizados



Fuente: Propia con base en NDLI (1995)

Figura 2.4 Definición de categorías, clases y tipos de vehículos no motorizados



Fuente: Propia con base en PADECO (1996)

2.6. COSTOS DE TRANSPORTE MOTORIZADO

Los costos de las velocidades y circulación de los vehículos motorizados se determinan como función de las características de cada tipo de vehículo y de la geometría, tipo de capa de rodadura y condición actual de la carretera, ambos bajo condiciones de tráfico congestionado o no congestionado. Los costos de circulación se obtienen multiplicando las cantidades de los diferentes componentes por sus costos unitarios que se especifican por el usuario, en términos de financiación o económicos.

Los costos de financiación representan a los que incurre el operador del transporte al comprar u operar vehículos sobre la carretera. Los costos económicos representan los que afectan realmente a la economía de los propietarios u operadores de los vehículos, cuyos ajustes se hacen de acuerdo con los cambios del precio del mercado tales como impuestos, subsidios, restricciones de cambio de moneda, leyes laborales, etc. (Watanatada et al., 1987).

Se consideran los siguientes componentes de los costos de la circulación de los vehículos (COV)

- Consumo de combustible
- Consumo de lubricantes
- Neumáticos
- Consumo de accesorios
- Horas de trabajo de conservación
- Depreciación
- Interés
- Horas de conductor
- Gastos generales

El tiempo de trayecto se considera en términos de hora/pasajero durante el tiempo de trabajo, de no trabajo y horas de transporte de carga. Estos costos se expresan más adecuadamente, solo en términos económicos. Los costos adicionales debidos a la intransitabilidad de carreteras sin pavimentar o severamente deterioradas, se incluyen también en la cantidad total de los costos sobre los usuarios de las carreteras teniendo en cuenta el transporte motorizado.

Los costos de transporte motorizado se explican en el Anexo 1, en el cual se describe detalladamente el modelo de efectos sobre los usuarios de la carretera (RUE), a partir del cálculo de las velocidades de los vehículos motorizados, de los costos de circulación y del tiempo del trayecto. En el mismo, se incluye la descripción de los conceptos de la modelación, de las relaciones y de los valores predefinidos de los parámetros para cada componente del modelo RUE y de los vehículos estándar representativos del sistema HDM-4.

El Anexo 1 recapitula en español, el volumen 4 parte E – Analytical Framework and Model Descriptions – en su numeral E2 Vehicle Speeds and Operating Costs que hace

parte de la edición versión 1.0 del Marco analítico y descripción de los modelos contenidos dentro del sistema HDM-4.

2.7. TRANSPORTE NO MOTORIZADO

Los módulos de transporte no motorizado TNM como bicicletas, carruajes, carros de tracción animal y peatones, juegan un papel importante en el transporte de pasajeros y carga en muchos países. El uso de TNM aumenta en algunas regiones debido a su comodidad, flexibilidad y efectividad en sus costos, proporcionando transporte a bajo costo.

Además, este aumento está enfocado en el uso efectivo de la energía y en los impactos medioambientales, que provoca el siempre creciente transporte motorizado (TM), y que ha despertado la necesidad de crear mejores recursos para el TNM. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha demostrado que las necesidades del transporte general en muchos países, no son necesariamente las del transporte motorizado. Es por esto, que las políticas de inversión en el sector del transporte por carretera deben incluir e incentivar al transporte no motorizado.

Se ha desarrollado un método adecuado para calcular los costos de circulación en los que incurre el TNM sobre las carreteras, estimando los beneficios obtenidos por el TNM a partir de las mejoras a la carretera (Odoki and Kerali, 1999). La presencia de TNM puede influenciar la velocidad del transporte motorizado, afectando por esto, los costos de circulación de los vehículos motorizados. En adición, políticas tales como las mejoras a la carretera, tienen influencia en los costos y los beneficios de los usuarios del transporte motorizado y no motorizado.

El módulo de transporte no motorizado se explica en el Anexo 2, en el cual se describe detalladamente la ejecución de los modelos de los efectos sobre los usuarios de la carretera (RUE), para calcular las velocidades de los vehículos no motorizados, los costos de la circulación y el tiempo de viaje. Así mismo, se proporciona una visión general de la lógica y los conceptos de la modelación, una descripción de las relaciones y los valores predefinidos de los parámetros para cada componente del modelo RUE y de los tipos representativos de transporte no motorizado (TNM) en el sistema HDM-4.

El Anexo 2 recapitula en español, el volumen 4 parte E – Analytical Framework and Model Descriptions – en su numeral E3 Non-Motorised Transport que hace parte de la edición versión 1.0 del Marco analítico y descripción de los modelos contenidos dentro del sistema HDM-4.

2.8. SEGURIDAD EN LA CARRETERA

El sistema HDM-4 permite a los usuarios del software definir una serie de tablas de comparación de escalas de accidentes. Estas tablas son básicamente descripciones generales de las tasas previstas de accidentes, definidas de acuerdo con un grupo particular de atributos del tránsito y de la carretera, por ejemplo, tipo de carretera, nivel del tránsito y patrón del flujo, presencia de TNM y clase de geometría. Estas tablas permiten la implantación de un análisis de seguridad en la carretera, seguido de una

revisión detallada de varios métodos de estudios, de modelación y de análisis de seguridad de la carretera, como lo recomienda ISOHDM.

Para cada tipo de carretera o de intersección, se requiere que el usuario especifique la tasa de accidentes por su gravedad, es decir, fatal, con heridos o solamente con daños, en términos del número de accidentes por 100 millones de vehículos-kilómetro. Cuando se mejora una carretera, por ejemplo, añadiendo carriles separados para TNM y adición de bermas (o ampliación), se puede especificar un nuevo grupo de tasas de accidentes, basado en los datos observados para carreteras con intensidad de tránsito y características geométricas parecidas. Por eso, es posible analizar los cambios y los costos del número total de accidentes que resultan del mejoramiento de la carretera.

La seguridad en la carretera se explica en el Anexo 3, en el cual se describen las especificaciones del análisis de seguridad en la carretera en HDM-4. El sistema HDM-4 permite a los usuarios del software definir una serie de tablas de consulta de las tasas de accidentes. Estas tablas son básicamente una descripción genérica de las tasas de accidentes previstos que se pueden definir en diferentes formas de acuerdo con un grupo particular de atributos del tráfico y de la carretera, por ejemplo, tipo de carretera, patrón del nivel y de la intensidad del tráfico, presencia de transporte no motorizado (TNM) y clase de geometría. Esta tabulación permite la ejecución del análisis de seguridad en el sistema HDM-4 recomendado (ISOHDM, 1995), seguido de un informe detallado de los diferentes estudios de seguridad en la carretera, de la modelación y de los métodos de análisis.

El Anexo 3 recapitula en español, el volumen 4 parte E – Analytical Framework and Model Descriptions – en su numeral E4 Road Safety que hace parte de la edición versión 1.0 del Marco analítico y descripción de los modelos contenidos dentro del sistema HDM-4.

2.9. COSTOS TOTALES SOBRE LOS USUARIOS DE LA CARRETERA

Estos costos comprenden:

- Costo de circulación de vehículos de transporte motorizado TM.
- Costo del tiempo de trayecto del TM.
- Costo de tiempo de viaje y de circulación de vehículos de transporte no motorizado TNM.
- Costo de los accidentes.

El costo anual sobre los usuarios de la carretera en las diferentes opciones de inversión se obtiene de la siguiente ecuación:

$$RUC_j = COV_j + TTC_j + NMTOC_j + AC_j$$

Donde:

RUC_j = costo sobre los usuarios bajo la opción de inversión j (moneda)

COV_j = costo de circulación de los vehículos TM, bajo la opción de inversión j (moneda)

TTC_j = costo del tiempo de viaje del TM, bajo la opción de inversión j (moneda)
NMTOC_j = costo del tiempo de viaje y circulación del TNM, bajo la opción de inversión j (moneda)
AC_j = costo anual de los accidentes, bajo la opción de inversión j (moneda)

La descripción completa y detallada de los submodelos de costos de transporte motorizado, costos de transporte no motorizado y seguridad en la carretera utilizados en el sistema HDM-4, junto con sus características, se incluye en los Anexos 1, 2 y 3.

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO EFECTOS SOBRE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS

La guía de calibración y adaptación de HDM-4 contiene un manual para la preparación de los análisis con el sistema HDM. Principalmente, está relacionado con dos niveles, que son Aplicación y Calibración definidas como calibraciones de nivel 1 y nivel 2, respectivamente, y que son las más usadas. Para el desarrollo de esta tesis se utilizó esta guía.

Para realizar una calibración de nivel 3 es necesario remitirse a las referencias de los antecedentes de HDM-III (Watanatada et al., (1987a); (1987b); (1987c); Paterson, 1987; y Chesher y Harrison, 1987) que definen la investigación original. Estos contienen material del diseño experimental, teórico, de las formas de los modelos, de los métodos analíticos y de las limitaciones empíricas.

3.1. EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LAS PREDICCIONES DE HDM-4

Para la evaluación de la confiabilidad de las predicciones de HDM-4 existen diferentes técnicas que se pueden utilizar para evaluar los pronósticos en el sistema. El más apropiado depende de la disponibilidad de los datos y de su objetivo. Para el modelo de efectos sobre los usuarios, se utilizan tres técnicas para evaluar estos pronósticos, relacionados con las encuestas controladas, encuestas de tarifas y encuestas de parque automotor, los cuales se describen a continuación.

3.1.1. Efectos sobre los usuarios de la carretera: encuestas controladas. Las encuestas controladas del RUE frecuentemente se concentran en el consumo de combustible ya que este es el componente de medida más sencillo. El desgaste de los neumáticos se puede investigar, pero es generalmente difícil de ejecutar como un estudio efectivo. El mayor problema es establecer con precisión la cantidad de desgaste del neumático, ya que es una pequeña cantidad. No obstante, como se describe en Transit (1997), aun cuando se usen condiciones más controladas, se pueden producir errores significativos.

3.1.2. Efectos sobre los usuarios de la carretera: encuestas de tarifas. Una de las formas más fáciles de evaluar la precisión de las proyecciones de RUE en HDM-4 es compararlas con las tarifas del mercado. Esto se puede hacer en las calibraciones de nivel 1 y nivel 2.

Existe una hipótesis basada en que las tarifas reflejan el COV total de un vehículo y, por lo tanto, ofrecerán un estimado razonable, no solamente de la magnitud del COV sino también de los costos marginales en diferentes condiciones de circulación. Generalmente, las operaciones de carga son más independientes que las de pasajeros, ya que las mismas tienen frecuentemente subsidios/regulaciones de precios.

Para recoger los datos de las tarifas con estos propósitos, se debe considerar lo siguiente:

- El uso de datos de tarifas del transporte para la calibración del modelo es más apropiado cuando existe un mercado competitivo, es decir, donde hay un mínimo de control del gobierno en la operación. Cuando las regulaciones o los monopolios afectan a los servicios de transporte, los datos deberán ser investigados con mayor atención.
- Es mejor recoger datos de una compañía sencilla que opere sobre una escala de condiciones, que de muchas compañías. Como se describe en Chesher y Harrison (1987), la variación en los costos entre compañías es frecuentemente mayor que las variaciones debidas a las condiciones de la operación.
- Los datos se deberían estandarizar de forma que sus efectos sobre los niveles de la carga sean tenidos en cuenta.
- Los pronósticos de HDM-4 se deberían hacer usando costos financieros en lugar de costos económicos.
- Los costos pronosticados deberían ser menores que las tarifas, debido a la necesidad de que el propietario obtenga beneficios en el viaje.

Hay dos componentes que se reflejan en la tarifa:

- El costo no productivo (por ejemplo, carga/descarga, reparaciones y esperas por trabajo)
- El costo de la distancia por km

Así, el costo se puede expresar como:

$$COST = a_0 DIST + a_1$$

Donde:

COST = total del costo del viaje

DIST = distancia del viaje

a_0 = costo marginal por km debido a la distancia viajada

a_1 = costo fijo

La tasa de la tarifa se puede expresar como:

$$RATE = a_0 + \frac{a_1}{DIST}$$

Donde:

RATE = costo por km

En vehículos de pasajeros, las tasas de los taxis son generalmente una fuente de datos para la evaluación de los pronósticos del modelo. Estas tasas necesitan ser ajustadas por el valor del tiempo del conductor.

Teniendo en cuenta que las encuestas de tarifas se pueden hacer en las calibraciones de nivel 1 y nivel 2, para la presente tesis se utilizaron algunos datos de esta técnica, los cuales se utilizarán para evaluar los pronósticos en el sistema y las proyecciones de

RUE en HDM-4. Lo anterior, basado en la hipótesis de esta técnica, donde las tarifas reflejan el COV total de un vehículo y, por lo tanto, ofrecerán un estimado razonable, no solamente de la magnitud del COV sino también de los costos marginales en diferentes condiciones de circulación.

3.1.3. Efectos sobre los usuarios de la carretera: encuestas del parque automotor. Las encuestas del parque automotor son frecuentemente una buena fuente de datos, particularmente cuando existe disponibilidad de buenos informes. Por ejemplo, para este tipo de encuesta existe la posibilidad de usar bitácoras de los conductores para investigar los costos de los vehículos, mediante el uso de informes de compañías o a través del desarrollo de buenas bases de datos de los operadores privados.

En este ámbito, es posible indicar que los costos se ven afectados por ejemplo en el consumo de neumáticos que está influenciado por la angularidad de la grava que produce incrustaciones en su revestimiento.

3.2. SENSIBILIDAD DE HDM-4

Es importante tener en cuenta el nivel de sensibilidad de cada parámetro del modelo, así como suministrar los datos de entrada básicos y los valores para los coeficientes del modelo, ya que se puede ofrecer una mayor importancia a los parámetros principales y una menor a los de segundo o tercer orden.

En HDM-4 los análisis de sensibilidad se determinan y clasifican por niveles, y se cuantifican por el impacto de la elasticidad, que es la relación del cambio de porcentaje de un resultado específico con el porcentaje del cambio de un parámetro ingresado, manteniendo todos los demás parámetros como un valor medio constante.

Por ejemplo, si un aumento del 10 por ciento sobre la carga del tránsito para una vía causa un 2,9% de aumento en la regularidad después de 15 años, el impacto en la elasticidad para la carga del tránsito es positiva (0,29). Si, por el contrario, se presenta una disminución de 2,9%, el valor deberá ser negativo (-0,29).

Existen diferentes fórmulas utilizadas para llevar a cabo un análisis de sensibilidad. La fórmula usada generalmente en HDM-4 y la cual se aplicará para el presente estudio, es el método tradicional **ceteris paribus** (todo lo demás constante), cambiando un factor sencillo mientras se mantienen constantes todos los demás. La fórmula alternativa usando experimentos factoriales que combinan todos los niveles de un factor con todos los niveles de todos los otros factores no se usará debido al gran número de combinaciones a tener en cuenta. Por lo tanto, el análisis aquí no considera las interacciones del factor.

Como una base de análisis se han establecido cuatro clases de sensibilidad para el modelo como función del impacto de elasticidad. Cuanto mayor sea la elasticidad, más sensibles serán los pronósticos del modelo. Estas clases se detallan en la Tabla 3.1. A lo largo de este documento los términos S-I al S-IV se usan para referirse a las diferentes clases de sensibilidad.

Tabla 3.1 Clases de sensibilidad de HDM

Impacto	Clases de sensibilidad	Impacto de la elasticidad
Alto	S-I	> 0,50
Moderado	S-II	0,20 – 0,50
Bajo	S-III	0,05 – 0,20
Intangible	S-IV	< 0,05

Fuente: Manuales de HDM-4

Los datos o coeficientes del modelo con impactos que van de moderado a alto (S-I y S-II) son los de mayor aplicación, por lo tanto, son los más utilizados. El impacto bajo y el intangible (S-III y S-IV) se deben tener en cuenta solamente si se incluyen tiempos o recursos. Generalmente, para S-III y S-IV se asumen los valores predefinidos de HDM-4 ya que ofrecen resultados adecuados.

3.2.1. Sensibilidad para el modelo efectos sobre los usuarios de la carretera. El RUE se compone de COV, tiempo de viaje, emisiones de los vehículos (gases nocivos y ruido), seguridad y uso de energía junto a los efectos del desarrollo. La presente investigación solamente considerará los componentes de los COV teniendo en cuenta que estos últimos 4 componentes que hacen parte del modelo RUE, no se incluyen en la guía de calibración y adaptación del HDM-4 en su Versión 1.0, para lo cual se recomienda en futuras investigaciones, realizar el análisis de calibración de estos componentes, una vez sean incluidos en una próxima edición de la guía. Por lo anterior, se darán las respectivas recomendaciones de calibración para cada uno de los componentes, partiendo de bases de datos y estadísticas recopiladas para las condiciones locales en lo correspondiente a la información relacionada con los datos de entrada para niveles de calibración 1 y 2.

Como se describe en el capítulo 1, el modelo RUE de HDM-4 pronostica la cantidad de recursos consumidos; por ejemplo, la cantidad de combustible y neumáticos. Estos se multiplican por los costos unitarios para obtener el costo total. Existen diferentes componentes modelados y como se muestra en la Figura 3.1, están influenciados por diferentes factores.

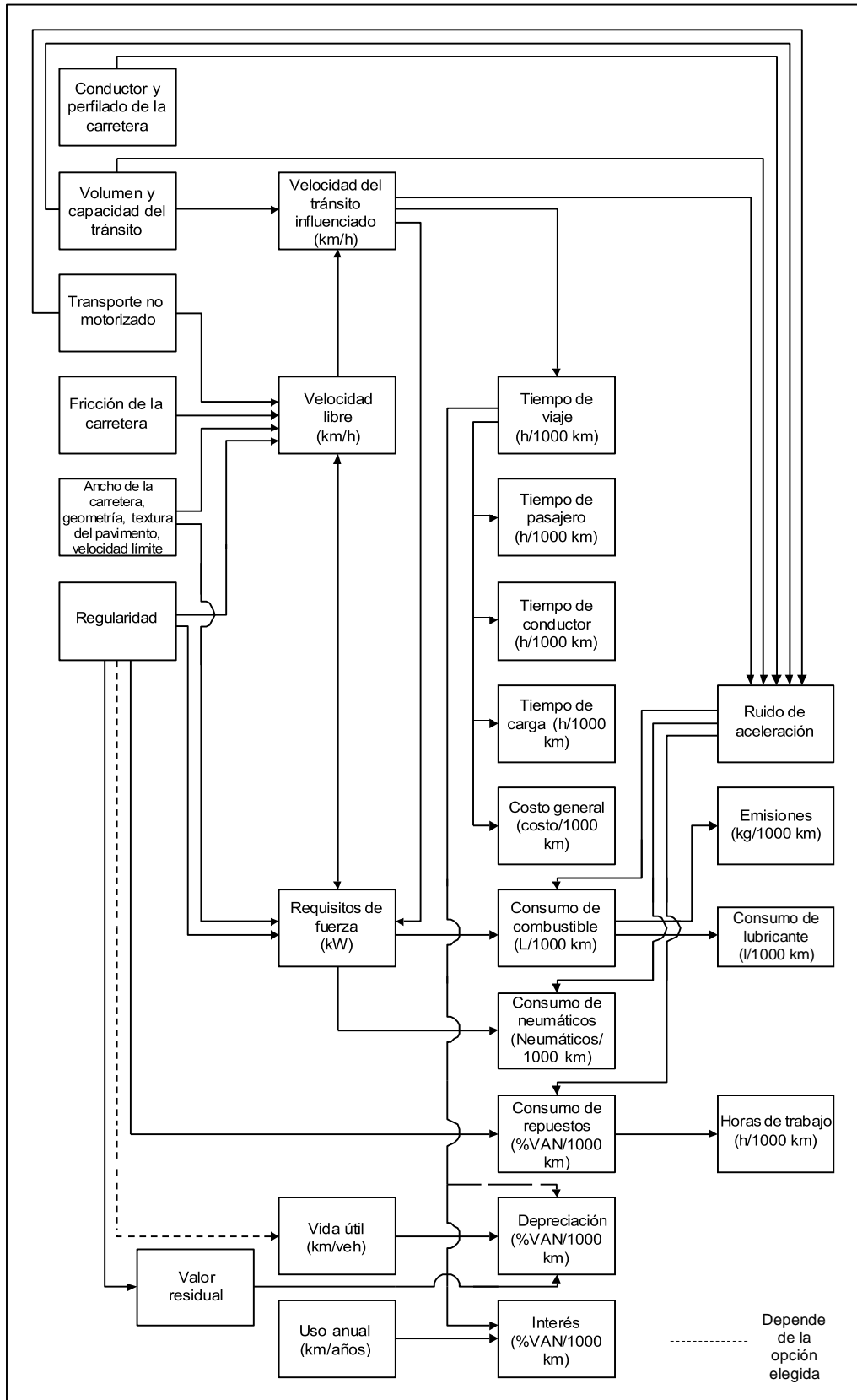
El RUE está principalmente influenciado por la velocidad de los vehículos y la regularidad. La influencia de estos factores varía dependiendo del componente de RUE. Por ejemplo, el consumo de combustible es muy sensible a la velocidad, pero relativamente sensible a la regularidad. Por el contrario, el consumo de repuestos no es sensible a la velocidad, pero está muy influenciado por la regularidad.

Cuando se considera el RUE hay dos situaciones importantes: magnitud total de RUE y efecto de las condiciones de la circulación sobre RUE.

Lo anterior, es muy importante en situaciones en las que existen diferentes longitudes de recorrido. Los efectos de las condiciones de la circulación sobre RUE son importantes cuando se comparan cambios de la condición de la carretera.

Con una base establecida por los resultados de los análisis realizados con datos de costos unitarios adaptados de los estudios actuales de HDM-4 en Australia, India y Tailandia, se identificaron y asignaron las variables del modelo RUE a las diferentes clases de sensibilidad como se indica en la Tabla 3.2.

Figura 3.1 Componentes de RUE y sus interacciones en HDM-4



Fuente: Manuales de HDM-4

Tabla 3.2 Clases de sensibilidad para el modelo RUE de HDM-4

Clase	Impacto de elasticidad	VARIABLES O DATOS IMPORTANTES DE COV TOTAL	VARIABLES O DATOS IMPORTANTES DE LOS AHORROS DE COV
S-I	> 0,50	Precio de reemplazo del vehículo Exponente k_p del modelo de repuestos	Precio de reemplazo del vehículo Exponente k_p del modelo de repuestos
S-II	0,20 - 0,50	Regularidad en IRI Modelo a_1 de los repuestos	Regularidad en IRI Modelo a_1 de los repuestos
S-III	0,05 - 0,20	Coeficiente de fuerza aerodinámica Multiplicador $C_{d_{mult}}$ de fuerza aerodinámica Utilización anual Factor básico de fuerza-combustible ξ_b Costo del combustible Costo de la mano de obra Costo del tiempo de pasajero Velocidad deseada Eficiencia de la conducción Fuerza de la conducción Factor fuerza de accesorios del motor Combustible ξ Tasa de interés Factor de calibración de mano de obra Densidad del aire Promedio máximo rectificado de la velocidad Factor de fricción X_{TNM} del TNM Número de pasajeros Número de ruedas Modelo a_0 de los repuestos Límite de velocidad marcado Área frontal proyectada Resistencia a la rodada CR1 Resistencia a la rodada CR2 a_0 Factor de resistencia a la rodada CR2 Regularidad-velocidad a_0 Factor de fricción X_{FRI} Factor de corrección de la línea de convergencia de la velocidad Factor de cumplimiento del límite de velocidad Masa del vehículo Vida útil del vehículo Diámetro de las ruedas	Coeficiente de fuerza aerodinámica Multiplicador $C_{d_{mult}}$ de fuerza aerodinámica Utilización anual Factor básico de fuerza-combustible ξ_b Costo del combustible Costo de la mano de obra Costo del tiempo de pasajero Costo de los neumáticos Eficiencia de la conducción Fuerza de la conducción Factor fuerza de accesorios del motor Velocidad de marcha en vacío Combustible Tasa de interés Factor de calibración de mano de obra Densidad del aire Promedio máximo rectificado de la velocidad Número de pasajeros Número de ruedas Modelo a_0 de los repuestos Límite de velocidad marcado Área frontal proyectada Resistencia a la rodada CR1 Resistencia a la rodada CR2 a_0 Factor de resistencia a la rodada CR2 Regularidad-velocidad a_0 Velocidad Factor de cumplimiento del límite de velocidad Masa del vehículo Volumen de desgaste de la goma Diámetro de las ruedas
S-IV	<0,05	Todos los demás	Todos los demás

Fuente: Manuales de HDM-4

3.2.2. Clases de sensibilidad

- Alto impacto, Clase S-I (> 0,5)

En ambos grupos de análisis, los resultados indican que los parámetros de alto impacto son solamente el precio de reemplazo del vehículo y el exponente k_p del modelo de repuestos. Lo anterior, se utiliza para calcular los costos de los repuestos, de la depreciación y de los intereses. Esto define la magnitud del consumo de repuestos y el impacto de la edad de los vehículos en el mismo modelo de repuesto.

- Impacto moderado, Clase S-II (0,2 – 0,5)

Los parámetros de impacto moderado son la regularidad y el consumo de repuestos, a_1 y condicionan los efectos de la regularidad.

- Bajo impacto, Clase S-III (0,05 – 0,2)

La categoría de bajo impacto está compuesta por muchos parámetros que cubren una variedad de atributos y que incluyen la mayoría de los costos unitarios. La mayor diferencia entre los dos análisis de costos totales versus efectos de la regularidad, está en la importancia del factor de fricción (XFRI) y el factor no motorizado (XTNM) en el análisis del costo total. Esto se debe a la importancia de las velocidades en los costos totales, a diferencia de los efectos de la regularidad-velocidad que son importantes en los costos de mantenimiento de la vía para tener un índice de regularidad menor

- Impactos intangibles, Clase S-IV (< 0,05)

La mayoría de los datos de HDM-4 tienen un impacto intangible en los resultados, por lo que en la mayoría de los análisis de HDM-4 se adoptan los valores predefinidos.

3.3. CALIBRACIÓN DE LA FLOTA VEHICULAR PARA VÍAS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ SEGÚN EL MODELO RUE EN HDM-4

El modelo efectos para los usuarios de las carreteras (RUE) del HDM-4 permite determinar los efectos de la operación vehicular (VOC), los efectos de emisiones y seguridad y el tiempo empleado por los usuarios; los costos para los usuarios se obtienen a partir de los resultados del RUE, al cual se le asignan valores monetarios. Como el modelo RUE del HDM-4 es la base del estudio, es necesario iniciar con la definición de los datos básicos de entrada predeterminados del modelo, en cuanto a las características de la vía, características de la flota vehicular y su calibración.

Como punto de partida es necesario recopilar y analizar la información de la flota vehicular del Departamento de Boyacá, la normatividad aplicable para esta, las características principales y finalmente definir los tipos de vehículos a ser analizados. Una vez definida la flota vehicular, se debe establecer el vehículo tipo característico de cada grupo y definir las características de la flota vehicular, así como los datos de entrada para su calibración.

Posteriormente, es necesario definir los demás parámetros que intervienen en la calibración del modelo para los niveles 1 y 2. A continuación se presenta el desarrollo del estudio.

3.3.1. Selección de vehículos representativos. Como no es posible modelar los costos de circulación de los vehículos individualmente, es necesario recurrir al uso de vehículos representativos. Existen vehículos cuyas características se pueden considerar como representativas dentro de ciertas clases. Dependiendo de la naturaleza del estudio, se puede adoptar cualquier número de vehículos representativos. Este número está influido por factores como la composición del tránsito, las diferencias funcionales entre los diferentes tipos de vehículos, los objetivos del estudio y la disponibilidad y calidad de los datos.

HDM-4 permite utilizar un número ilimitado de vehículos representativos y usa una gran cantidad de estos para definir el parque de vehículos. No obstante, las dificultades asociadas a la precisión en la descripción de las características de los vehículos representativos y el continuo cambio en la composición del parque, indica que siempre

puede haber errores, independientemente del número de vehículos seleccionados. Se recomienda utilizar para la mayoría de los estudios un mínimo de siete vehículos:

- Motocicletas (MC)
- Vehículos pequeños de pasajeros (PC)
- Camioneta o vehículo de reparto y camiones livianos (LDV-LGV)
- Camiones < 3,5 Ton (LT)
- Camiones > 3,5 Ton, camiones rígidos multi-ejes y camiones articulados (MT-HT-AT)
- Buses < 3,5 Ton (LB)
- Buses de 3,5 a 8,0 Ton (MB-HB)

Si se dispone de los datos adecuados para la calibración del modelo teniendo en cuenta los valores adoptados de otras regiones o valores por defecto establecidos por HDM-4, los camiones medianos y pesados pueden ser eliminados ya que estos vehículos tienden a presentar las mayores variaciones en el modelo RUE y producen el mayor impacto en el comportamiento del pavimento.

Sin embargo, asumir valores por defecto en los modelos conlleva posiblemente a errores en las predicciones, y en el caso de la estimación del consumo de combustible se han obtenido diferencias hasta del 200% con respecto a valores reales, correspondiendo las mayores diferencias a los camiones en situación de congestión vehicular (Greenwood, Dunn y Raine, 2007). Esto y otros aspectos, entre los que se destacan la desactualización, alcance, tecnología, comportamiento del conductor y políticas de transporte, hacen que los modelos de costos de operación vehicular deban ser calibrados (Chesher y Harrison, 1987; Altamira, 2003), y entre estos deben estar, especialmente, los modelos de consumo de combustible.

Por ejemplo, la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones se considera que tiene una alta participación en los costos de transporte, encontrándose un conjunto de modelos que permiten cuantificarlo adecuadamente para condiciones de operación definidas.

Lo anterior, basado en un estudio adelantado por la Universidad Nacional de Medellín (Posada & González-Calderón, 2013), relacionado con el consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera, en el cual se concluye que las características de los modelos hacen imprescindible, por las condiciones normales bajo las cuales son creados, que sean adaptados a las condiciones del lugar donde se utilizarán, para lo cual es necesario realizar investigaciones que permitan efectuar en forma adecuada tal adaptación y así los resultados obtenidos sean fiables (Posada, 2012); situación que no es ajena a la realidad de muchos lugares como Colombia, en donde no se han realizado trabajos de este tipo (ACCEFYN, 2013). Esto se estima de alta conveniencia para poder conocer con mayor precisión el efecto de las intervenciones en las carreteras.

Algunos estudios se han hecho para adaptar y calibrar estos modelos a condiciones locales de uso (Altamira, 2004). Se ha encontrado en estos estudios que existen diferencias entre los datos del modelo y los reales cercanas al 200% (Greenwood y otros, 2007); y en particular para el caso del HDM-4 se presenta un rango entre 110 % y 270 %, para camiones (Posada, 2012).

3.3.2. Selección de tipos de vehículos de la flota vehicular en Boyacá. Para la definición de los datos de entrada para la aplicación de las ecuaciones del sistema HDM-4, se realizó el análisis de la flota vehicular del Departamento de Boyacá, se definieron los tipos de vehículos a utilizar y los niveles jerárquicos aplicables.

3.3.3. Características y estadísticas de la flota vehicular en Boyacá. La caracterización de la flota vehicular en Boyacá hace parte fundamental de la definición de los diferentes tipos de vehículos que se van a analizar en las ecuaciones del sistema HDM-4. Con el fin de llevar a cabo esta caracterización, se recopiló y se analizó la información obtenida de diferentes fuentes como:

- Instituto de Tránsito de Boyacá ITBOY: Entidad que coordina la seguridad y movilidad vial en el departamento de Boyacá y administra el registro de tránsito.
- Revista Motor: Publicación especializada en el país, la cual presenta información sobre carros, buses y otros vehículos que se encuentran en el mercado nacional.
- Asociación Colombiana de Vehículos Automotores ANDEMOS: Asociación especializada de vehículos automotores en Colombia.
- Registro Único Nacional de Tránsito RUNT: es un sistema de información que permite registrar y mantener actualizada, centralizada, autorizada y validada la misma sobre los registros de automotores, conductores, licencias de tránsito, empresas de transporte público, infractores, accidentes de tránsito, seguros, remolques y semirremolques, maquinaria agrícola y de construcción autopropulsada y de personas naturales o jurídicas que prestan servicio al sector.
- Ministerio de Transporte: Organismo del Gobierno Nacional encargado de formular y adoptar las políticas, planes, programas, proyectos y regulación económica del transporte, el tránsito y la infraestructura, en los modos carretero, marítimo, fluvial, férreo y aéreo del país.
- Federación de Aseguradores Colombianos Fasecolda: encargada de agrupar a las compañías de seguros, de reaseguros y a las sociedades de capitalización en Colombia.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE: Entidad oficial que tiene como propósito la producción y difusión de investigaciones y estadísticas en aspectos industriales, económicos, agropecuarios, poblacionales y de calidad de vida
- Federación Nacional de Comerciantes FENALCO y Asociación Nacional de Empresarios de Colombia ANDI: Gremios representantes de la industria y la importación de vehículos y de motocicletas del país
- Fabricantes y/o ensambladores de marcas reconocidas como Chevrolet, Renault, Isuzu, Hino, Mazda, Kia: información sobre especificaciones de diferentes tipos de vehículos.

La información requerida incluye costos económicos y financieros relacionados con los tipos de vehículos, que para el caso de Colombia se trata de equipos clasificados generalmente por el INVIAS. Con base en los registros suministrados por los diferentes organismos señalados anteriormente, el parque automotor en Boyacá se encuentra conformado por los siguientes tipos de vehículos motorizados y no motorizados:

Motorizados (MT): Automóvil, bus, buseta, camión doble troque, volqueta doble troque, camión liviano, minibús, camioneta, campero, tracto camión, motocicleta, maquinaria agrícola, cuatrimoto, minivan.

No motorizados (NMT): Tracción animal, maquinaria industrial, carruaje, mini tractor, bicicleta (cuatriciclo, ciclomoto, motoneta).

Para efectos de determinar el porcentaje de vehículos registrados en vías de Boyacá, se realizaron agrupaciones de acuerdo con las características generales de los vehículos y a las definiciones de la norma NTC 4788 de 2004 para los diferentes tipos de vehículos, como se presenta a continuación:

- Buses: conformado por minibús, microbús, bus y buseta.
- Camiones: tracto-camión, camión, doble troque y volqueta doble troque.
- Motocicletas: conformado por motocicleta, ciclomoto, motoneta y motocarro.
- Otros: minitractor, tracción animal, maquinaria agrícola, maquinaria industrial, mototriciclo y cuatrimoto.

Los parámetros de entrada para caracterizar la flota que está al servicio de las diferentes etapas de transporte por carretera, están referidos a los costos económicos o financieros que se describen a continuación y a las características básicas de la flota vehicular.

3.3.3.1. Selección y clasificación de los vehículos. De las investigaciones realizadas de las principales fuentes mencionadas anteriormente se tiene que:

- Vehículos livianos

El Registro Único Nacional de Tránsito – RUNT, es un sistema de registro centralizado en línea, que, valida, registra y autoriza las transacciones relacionadas con los once (11) registros que lleva el gobierno nacional, acorde con la Ley 769 de 2002 y la Ley 1005 de 2006, lo que se espera que aporte al Estado la información necesaria para la adopción de políticas en materia de transporte y tránsito e igualmente para controlar y planificar esta actividad. Dichos registros son: los registros de automotores, conductores, licencias de tránsito, empresas de transporte público, infractores, accidentes de tránsito, seguros, remolques y semirremolques, maquinaria agrícola y de construcción autopropulsada y de personas naturales o jurídicas que prestan servicio al transporte y tránsito. En este caso, a partir del RUNT, junto con el Instituto de Tránsito de Boyacá y la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores, ANDEMOS, en sus registros actualizados a diciembre de 2018, fue posible determinar lo siguiente:

- La flota vehicular registrada en el Departamento de Boyacá cuenta con la siguiente distribución: 56% son automóviles pequeños (particular y taxi), el 13% son utilitarios o camionetas y 24% motocicletas, conformando el 93% de la totalidad de vehículos.
- Dentro del 69% de automóviles, se encuentran vehículos tipo taxi en un 8% de representación, que deben ser analizados por separado debido al comportamiento que presentan en el tráfico.
- Las motocicletas representan un alto porcentaje dentro del total de la flota vehicular del Departamento de Boyacá.
- La flota vehicular en Boyacá, incluyendo todos los vehículos tipo, es relativamente reciente, cerca del 57% de la flota son modelos 2010 a 2016. En cuanto a la flota del

TPCU, la edad promedio está cercana a los 11 años debido a que hay casos en los que la edad promedio de estos vehículos es del orden de 15 años.

- La mayoría de los vehículos utilizan gasolina como combustibles (automóviles) mientras que los camiones y buses utilizan ACPM como combustible.
- Los automóviles más comerciales en Boyacá son marca Chevrolet que van desde los 1000 cm³ hasta los 2400 cm³ con un porcentaje del orden de 25%.
- Los utilitarios de mayor venta en Boyacá son marca Chevrolet y marca Renault.
- Para el análisis del estudio, no se realiza discriminación para automóviles debido a que los vehículos tipo auto pequeños, medianos o grandes presentan las mismas características de cualquier automóvil en el momento de procesarlos en el sistema HDM-4.
- De la información de la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores ANDEMOS, se tiene que, para el Departamento de Boyacá, las principales marcas vendidas para motocicletas son Autec y Honda.

- Buses

Debido a que para el Departamento de Boyacá no existe una clasificación definida de buses, ni se cuenta con análisis de dicho parque automotor, se tomará como referencia la clasificación y los estudios adelantados para la ciudad de Tunja (excepto buses de mayor tamaño – buses de dos pisos), teniendo en cuenta que no solo es la capital del Departamento y cuenta con la mayor cantidad de vehículos, sino que es el centro (terminal satélite) de circulación del departamento.

De acuerdo con lo anterior, el Convenio interadministrativo No. 010 de 2012, celebrado entre la Alcaldía Mayor de Tunja y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se desarrolló la herramienta de transporte terrestre urbano de pasajeros y carga “simulación del efecto de proyectos de infraestructura y políticas de transporte”, para lo cual en el capítulo C-1 sistemas de transporte en Tunja – Características, se presenta el análisis del parque automotor de la ciudad de Tunja. Para el desarrollo de la presente investigación se parte de la información allí registrada (tomada únicamente como base para referencia del porcentaje de vehículos, asumiendo que se proyecta en la misma proporción), relacionada con el sistema de transporte público colectivo de la ciudad de Tunja aplicada para el caso de Boyacá, para lo cual se determina lo siguiente:

- La flota vehicular de buses en Tunja está compuesta por buses, busetas y microbús. El servicio de transporte público en Tunja es prestado por empresas privadas en dos tipos de vehículos, buseta y microbús (21 y 19 sillas respectivamente), aunque tienen registrados algunos vehículos tipo colectivo (13 sillas).
- Corresponden solo al 3% del total de los vehículos registrados en la ciudad.
- El principal combustible empleado en los buses es ACPM.
- La flota de buses en Tunja es relativamente nueva en comparación con la fecha del estudio, pues cerca del 60% de esta flota corresponde a modelos de los años 2004 y 2005.
- La principal marca de buses, busetas y colectivos es Chevrolet.

- Vehículos de transporte de carga (camiones)

Para los vehículos de carga, la resolución 4100 de 2004 y sus modificaciones, documentos del Ministerio de Transporte llamados “Caracterización del Transporte Terrestre Automotor de Carga en Colombia 2010-2012” se determina que:

- Los diferentes vehículos para el transporte de carga deben cumplir las mismas dimensiones en ancho y altura.
- La dimensión de altura máxima para la mayoría de las designaciones vehiculares es la misma con variaciones para los tipos C2, C3 y C4, destacando que C3 y C4 presentan igual altura máxima (4,40 m).
- Los valores máximos de peso bruto vehicular para cada designación vehicular, se pueden reunir en tres grandes grupos: camiones de 5 o más ejes, camiones de 3 y 4 ejes, camiones de 2 ejes.
- La distribución del parque automotor de carga por configuración de ejes presenta que, a nivel nacional, la mayoría de los vehículos pesados son de 2 ejes, y en segundo lugar los articulados 3S, mientras que la presencia de vehículos de 4 ejes es muy pequeña en comparación con las otras designaciones.
- El principal combustible empleado para vehículos de 2 ejes es la gasolina mientras que para los camiones articulados tipo 3S o más ejes, el combustible es ACPM.
- La marca con mayor representación en todas las configuraciones de camiones es Chevrolet. En Boyacá, solo un 5% de vehículos tipo camión representan el parque automotor, con respecto al total de la flota vehicular del Departamento.
- En Boyacá, los camiones articulados de 5 y 6 ejes tipo C3 (C3S2, C3S3) movilizan el 71% de la carga mientras que configuración de 4 ejes tipo C4, de menor uso y poco común en el medio, presentan una menor movilización de carga.
- La flota vehicular que más transporta carga, tiene en promedio entre 10 y 15 años. (modelos 2001 – 2006).
- Según el informe de vehículos de carga en Colombia adelantado por FENALCO y ANDI a diciembre de 2016, presenta que los camiones de mayor venta en el país durante el año 2009 son los Chevrolet FRR, Chevrolet NKR, JAC HFC y Chevrolet NQR.

Para el presente estudio y como base de análisis del sistema HDM-4, se recomienda la clasificación de camiones sugerida por el INVIAS para las siguientes clases: C2P, C2G, C3, C4, C5 y C6.

- Clasificación vehicular

A partir de la información recopilada y con las características principales detalladas anteriormente, se seleccionan los siguientes tipos de vehículos:

- **Motos:** se recomienda incluirla dentro de la calibración de la flota vehicular en Boyacá, dado que tiene un porcentaje alto de participación registrada. Se tomó como representativo los modelos de moto Bajaj Boxer CT 100 y Honda CB 110.
- **Taxis:** vehículos hasta de 1300 cm³ de cilindrada con valores de potencia baja (70 HP), combustible gasolina y curvas de desempeño (potencia, revoluciones, torque) similares. Se tomó como representativo para este grupo el vehículo Kia Picanto.

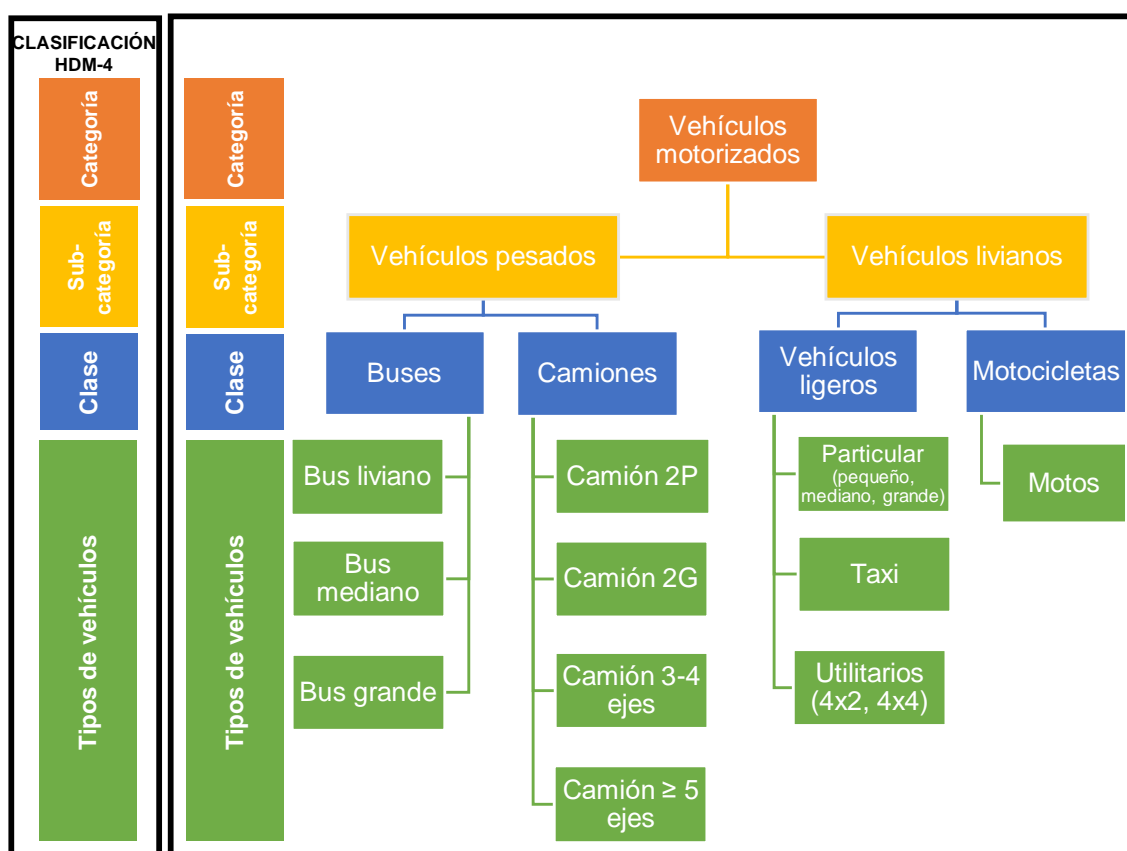
Cabe anotar que, para la calibración del sistema, los automóviles no se encuentran desagregados y se contabilizan como un solo tipo de automóvil. Estos vehículos deben ser desagregados de acuerdo con la presente clasificación recomendada.

- **Vehículos livianos particulares:** vehículos de 1000 cm³ hasta 3000 cm³ de cilindrada, con valores de potencia que oscilan entre 70 HP y 150 HP. Inicialmente estaban divididos en dos grupos, pero evaluando sus valores de potencia y curvas de desempeño (potencia, revoluciones, torque) del catálogo de especificaciones de vehículos típicos (Chevrolet Spark y Chevrolet Sail) se determinó que su comportamiento es similar, por lo que podían ser clasificados en un solo grupo. El combustible empleado es gasolina. Cabe anotar que en el sistema HDM-4 los automóviles no se encuentran desagregados y se contabilizan como un solo tipo de automóvil, se recomienda desagregar entre taxis y vehículos particulares siguiendo requerimientos para la evaluación de costos de usuarios.
- **Utilitarios:** automóviles con cilindrada desde 2000 cm³, con tracción tipo 4x2 y 4x4 incluyendo camionetas doble cabina, las cuales, debido a su tracción, su uso puede estar destinado a transporte de pasajeros y carga. Presentan curvas de desempeño similares, comparadas según las especificaciones técnicas de los vehículos más vendidos de este estilo (Renault Duster y Chevrolet Tracker). El combustible empleado es gasolina. El sistema HDM-4 presenta vehículos de características similares, por lo cual se recomienda su inclusión de esta manera.
- **Bus pequeño:** de acuerdo con la definición del Código Nacional de Tránsito Terrestre, un microbús es un vehículo para transporte de hasta 19 pasajeros. Se agrupan no solo los microbuses sino los también llamados colectivos y minibuses. Su cilindraje varía entre 2700 m³ hasta 3900 cm³. En el sistema HDM-4 se encuentra definido como autobús liviano de menos de 3,5 toneladas.
- **Bus mediano:** de acuerdo con la definición del Código Nacional de Tránsito Terrestre (Sección 2.2) es un vehículo para transporte de 20 a 49 pasajeros. Para la evaluación de costos de usuario de acuerdo con las condiciones del Departamento de Boyacá, la capacidad de estos buses se ha definido de 20 a 49 pasajeros. Se agrupan busetas y buses pequeños. El combustible empleado es ACPM. Se encuentra definido en el sistema HDM-4 como autobús mediano (de 3,5 a 8 toneladas).
- **Bus grande:** se ha definido como vehículo para transporte entre 50 y 60 pasajeros. De acuerdo con las condiciones en Boyacá, la capacidad de estos vehículos puede llegar a 60 pasajeros como es el caso de los buses de 2 pisos, los cuales transitan, generalmente, en vías departamentales. Con el fin de hacer una mayor aproximación a las condiciones locales, aplicado al Departamento de Boyacá, y con mayor incidencia para vías departamentales, se toma como vehículo representativo el bus de 2 pisos dada su incursión en el medio, así como la mayor afectación que puede producir al pavimento por la sollicitación de carga. El combustible empleado es ACPM. Se encuentra definido en el sistema HDM-4 como autobús pesado (de múltiples ejes o grande de dos ejes).
- **Camión pequeño de 2 ejes – 2P:** este camión de acuerdo con la resolución 4100 de 2004 se define como un camión rígido pequeño de dos ejes menor a 3,5 toneladas de capacidad. Este tipo de vehículo es el más común entre los camiones de transporte de carga; debido a su tamaño tiene libre circulación en las vías del Departamento. Se encuentra definido en el sistema HDM-4 como camión liviano (rígido pequeño de dos ejes aprox < 3,5 ton).

- **Camión grande de 2 ejes – 2G:** Este camión de acuerdo con la resolución 4100 de 2004 se define como un camión rígido grande de dos ejes mayor a 3,5 toneladas de capacidad. Debido a su tamaño tiene libre circulación en las vías del Departamento. Se encuentra definido en el sistema HDM-4 como camión liviano (rígido pequeño de dos ejes aprox > 3,5 ton).
- **Camión de 3 y 4 ejes:** Estos tipos de camiones se han definido en un mismo grupo teniendo en cuenta la escasa presencia de los camiones de 4 ejes en el Departamento y en el país según cifras del Ministerio de Transporte en la sección 2,4 y sus características similares definidas en la resolución 4100 de 2004. Así mismo, el efecto causado por estos ejes en el pavimento es muy similar, su tamaño es similar también por lo cual se recomienda que estén en el mismo grupo. En el sistema HDM-4 se encuentra clasificado como camión pesado (camión rígido de múltiples ejes). El combustible a emplear es ACPM.
- **Camión articulado de 5 o más ejes:** este tipo de camiones se han definido en un mismo grupo debido a las dimensiones similares que deben tener (resolución 4100 de 2004), las características similares que comparten y los daños que causan sobre el pavimento. De igual manera, se incluyen en el mismo grupo por la escasa presencia de estos camiones y las restricciones de flujo sobre varias zonas de las ciudades principalmente. Su combustible es ACPM. En el sistema HDM-4 se encuentra clasificado como camión articulado.

Con base en toda esta información, se realizó la clasificación de los vehículos como se propone en la Figura 3.2

Figura 3.2 Clasificación vehicular del parque automotor para vías de Boyacá



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2. Selección de los vehículos típicos para aplicación de modelos. Con el fin de aplicar los modelos de costos de usuario para vías de Boyacá, se realizó un análisis minucioso de la información de referencia con el fin de elegir los vehículos representativos o típicos de cada clase vehicular definida en la sección anterior.

El combustible definido para los camiones es el ACPM (motor diésel); por lo tanto, para los dos tipos de camiones: pequeño C2P y mediano C2G, el fabricante define el combustible como ACPM. No obstante, para evaluar los camiones de estas categorías que emplean la gasolina como combustible, en el sistema HDM-4 se debe crear un nuevo grupo de vehículos basado en estos dos vehículos tipo y en la definición de características, se selecciona gasolina en lugar de diésel.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los vehículos tipo, seleccionados para la aplicación de modelo:

Tabla 3.3 Clasificación vehicular para cada tipo de la flota vehicular en Boyacá


Clase	Tipo de vehículo	Vehículo típico	Muestra	Breve descripción
Motos	Motos	Bajaj Boxer CT 100		Vehículo de dos ruedas impulsado por un motor que acciona la rueda trasera. Transporta hasta dos personas.
		Honda CB 110		
Vehículos livianos	Particular (pequeño, mediano, grande)	Chevrolet Sail		Vehículo con cilindraje que varía entre 1400 c.c. a 3400 c.c.
	Taxi	Kia Picanto		Vehículo liviano tipo sedán de no más de 1000 c.c. de cilindraje.
	Utilitarios	Renault Duster		Vehículo usualmente de tracción 4x4 o 4x2 que cuenta con elementos del tipo todoterreno.
Vehículos pesados	Bus liviano	Bus ISUZU NKR 4JB1-TC		Vehículo de peso menor de 3,5 toneladas, empleado para el transporte de hasta 19 pasajeros
	Bus mediano	Bus Chevrolet FRR HINO FC9J		Vehículo para el transporte de 20 a 49 pasajeros.
	Bus grande	Marcopolo G7 1800DD		Vehículo para el transporte de entre 50 pasajeros y 60 pasajeros.
	Camión C2 Pequeño	Chevrolet NKR		Camión de 2 ejes pequeño tipo F-350.
	Camión C2 Grande	Chevrolet FTR		Camión de 2 ejes grande tipo F-9000.

Tabla 3.3 (Continuación)

Clase	Tipo de vehículo	Vehículo típico	Muestra	Breve descripción
	Camión C3-C4	Chevrolet FVZ		Camión de 3 o 4 ejes. Se incluyen camiones C1-S2, C3-S1, tracto-camión C2-S1, C2-S2.
	Camión ≥ C5	KENWORTH T800		Camión de 5 o más ejes, del tipo articulado. Se incluyen tracto-camión C3-S2, C3-S3 y más.

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Definición de datos de entrada de la flota vehicular en Boyacá para el HDM-4. Para definir los datos de entrada de la flota vehicular en Boyacá para las ecuaciones del sistema HDM-4, se debe analizar los datos básicos para cada tipo de vehículo, los cuales se detallan a continuación.

3.3.4.1. Atributos: definiciones. Los atributos de la flota vehicular se encuentran compuestos por: nombre, tipo base, clase, categoría, descripción y el método de vida útil (relacionado con la depreciación del vehículo). El sistema de clasificación vehicular definido, basado en el sistema HDM-4, emplea un alcance flexible en donde los vehículos motorizados se encuentran divididos en clases de vehículos. La clase comprende a varios tipos de vehículos que pueden especificarse con base en vehículos tipo estándar.

3.3.4.2. Atributos: características básicas. Las características básicas de cada vehículo se encuentran determinadas por características físicas, llantas, utilización y carga del vehículo principalmente.

- Características físicas (Physycal)

Dentro de las características físicas de cada vehículo incluido dentro del análisis, están la equivalencia de espacio para vehículos de pasajeros, número de llantas del vehículo y número de ejes. Para vías de Boyacá, se definirá esta información de acuerdo con parámetros similares de estudios previos, con nuevos parámetros a calibrar para incluir en el modelo y con algunos valores predeterminados, recomendados por el HDM-4.

- **Equivalencia del espacio que ocupa un vehículo de pasajeros (Passenger Car Space Equiv.):** Este se refiere al espacio relativo ocupado por un vehículo sobre la vía comparado con un vehículo de pasajeros (vehículo liviano mediano-grande), reflejando que el modelo de flujo-velocidad se ve afectado por las velocidades de los diferentes vehículos dentro del flujo de tráfico.
- **Número de llantas (No. of Wheels) y número de ejes:** El número de llantas por tipo de vehículo y el número de ejes se define a partir de las especificaciones técnicas de cada uno de los vehículos típicos establecidos para cada categoría.

- Llantas – neumáticos

El consumo de neumáticos puede llegar a ser uno de los mayores componentes dentro de los costos de usuarios, especialmente para aquellos vehículos que anualmente recorren grandes cantidades de kilómetros. Los principales parámetros de estudio son:

- **Tipo de llanta (Tyre type):** para el presente estudio, teniendo en cuenta la clasificación del parque automotor, se definen tres tipos principales de llanta: Bias-ply, Radial, Super – single.
- **Número de reencauchado por llanta:** El número de veces que se reencaucha una llanta varía de acuerdo con el estado de la carcasa y del usuario de los vehículos (privados o públicos).
- **Costo de Reencauche (en porcentaje de una llanta nueva):** El costo de reencauche es el precio que el consumidor debe pagar por la colocación de una banda nueva sobre la llanta usada, incluyendo el procedimiento mencionado en el numeral anterior. El costo de reencauche, en el sistema HDM-4, debe expresarse como porcentaje del costo de una llanta nueva.

Tabla 3.4 Costos relacionados con llantas por tipo de vehículo en Boyacá

Tipo de Vehículo	Referencia Llanta	Costo económico (\$)*	Impuesto IVA (19%)	Costo financiero (\$)	Costo económico de reencauche (%)	Costo Reencauche como % de costo llanta nueva*
Motos	No aplica	\$ 74.790	\$ 14.210	\$ 89.000	74.790	100%
Taxi	Llanta 165/65 R14 H415	\$ 100.000	\$ 19.000	\$ 119.000	100.000	100%
Liviano particular	Llanta 145/80 R14 H415	\$ 108.319	\$ 20.581	\$ 128.900	108.319	100%
Utilitario 4 x 4	Llanta 225/70 R16 RA 23	\$ 362.101	\$ 68.799	\$ 430.900	362.101	100%
Camión C2Pequeño	Llanta 7.00 R 15 12 lonas	\$ 331.008	\$ 62.892	\$ 393.900	182.055	55%
Camión C2Grande	Llanta 10 R 22.5 AH11	\$ 845.378	\$ 160.622	\$ 1.006.000	295.883	35%
Camión de 3 y 4 ejes	Llanta 295/80 R22.5 AU03	\$ 1.148.655	\$ 218.244	\$ 1.366.900	493.922	43%
Camión de 5 o más ejes	Llanta 11 R 24.5 AH11	\$ 1.338.571	\$ 254.328	\$ 1.592.900	468.500	35%
Bus liviano	Llanta 205/75 R17.5 AU03	\$ 436.134	\$ 82.865	\$ 519.000	239.874	55%
Bus mediano	Llanta 235/75R17,5 AU03	\$ 605.042	\$ 114.958	\$ 720.000	211.765	35%
Bus grande	Llanta 295/80 R22.5 AU03	\$ 1.148.655	\$ 218.244	\$ 1.366.900	493.922	43%

*El valor de 100% corresponde a los vehículos tipo que no admiten reencauchar llantas, por lo que se debe asumir que el costo del reencauche es valor equivalente a comprar una llanta nueva, por lo tanto, únicamente para vehículos pesados las llantas permiten el reencauche.

Fuente: Elaboración propia

- Utilización

La información sobre la utilización de un vehículo y su vida útil son elementos requeridos por el sistema HDM-4 para realizar el cálculo de consumo de partes y de costos de partes y mantenimiento principalmente. Los principales parámetros son:

- **Kilómetros recorridos anualmente:** Los kilómetros recorridos anualmente por un vehículo se refieren a la distancia acumulada que ha recorrido un vehículo en un período de 1 año.
- **Horas Trabajadas en el año:** Se definen como el tiempo en que el vehículo realiza un recorrido de ida y vuelta incluyendo el tiempo que se emplea en el cargue y descargue, así como el tiempo que se demora en suministrar combustible al vehículo.

- **Vida de servicio (vida útil básica) de los vehículos:** es el período en el que se opera un vehículo.
 - **Uso Privado de los vehículos:** El uso privado de un vehículo corresponde al uso particular que un vehículo tiene durante su vida útil, diferente al uso comercial que puede tener por ejemplo el transporte de pasajeros.
 - **Pasajeros por vehículo:** El número de pasajeros por vehículo corresponde a la tasa promedio de ocupación de cada uno de los tipos de vehículos que transitan por una vía y que transportan pasajeros, por tanto, para vehículos de carga no es aplicable.
 - **Porcentaje de pasajeros en viajes (desplazamientos) de trabajo:** El porcentaje de pasajeros en viajes de trabajo se refiere a la cantidad de pasajeros de cada uno de los vehículos cuyo origen o destino es su lugar de trabajo.
- Carga por eje (Loading)

Con el fin de predecir los impactos que genera el tránsito en el deterioro del pavimento y los efectos de la conservación, se debe conocer el factor de ejes equivalentes (ESALF) y el peso bruto vehicular (operating weight), valores que considera el HDM-4 para determinar la carga por eje de los vehículos.

3.3.4.3. Atributos: costos unitarios económicos. Los costos económicos indicados en el HDM-4 se requieren para establecer dentro del modelo los costos en que incurre un usuario de la vía, los cuales se ven afectados por parámetros relacionados con características de los vehículos, de las vías, entre otros.

Generalmente, los costos que se manejan en el comercio corresponden a costos financieros, los cuales se definen como los costos del mercado; mientras que los costos económicos son los costos netos, excluyendo impuestos y subsidios. Los costos que se deben ingresar al sistema se relacionan a continuación:

- Costos relacionados con el vehículo

Los costos relacionados con el vehículo se refieren a costos de vehículo nuevo, costos de las llantas nuevas, costos de combustible, costos de lubricantes, costos de mantenimiento, costo de equipo de trabajo, costos anuales, tasa de interés anual.

- **Costo de un vehículo nuevo:** Un vehículo nuevo se define como el medio de transporte recién matriculado (motorizado para este estudio) cuyo motor, carrocería y en general todas sus partes no han sido utilizadas y su kilometraje es cero.
- **Costo de llanta nueva (Replacement Tyre).**
- **Costo de Combustible (Fuel) expresado en \$ por litro.**
- **Costo de aceite lubricante:** Mezclas líquidas provenientes del petróleo crudo que se coloca generalmente entre dos piezas móviles, no se degrada y forma así mismo una película que impide su contacto permitiendo su movimiento incluso a elevadas temperaturas y presiones.
- **Costo de mantenimiento:** se refiere a los costos de mano de obra y los gastos de herramientas y generales del taller para llevar a cabo actividades rutinarias de mantenimiento como limpieza de motor, cambio de lubricante, cambio de frenos, etc. No se incluyen costos de reparaciones a gran escala como reparación de motor, causados por la falta de mantenimiento.

- **Salario de grupo operadores (\$/hora):** Ingresos percibidos por la tripulación que hace parte de la operación de los buses y camiones, generalmente está compuesto por un conductor y un ayudante.
- **Gastos anuales:** costos anuales en los que incurre un vehículo como administración, impuestos sobre vehículos automotores, seguro obligatorio, seguro contra todo riesgo, tarjeta de operación, revisión técnico mecánica, fondo de responsabilidad, entre otros.
- Tasa de interés anual (anual interest)

Teniendo en cuenta que el Gobierno Nacional es el encargado de definir una tasa de descuento de proyectos, para la evaluación económica del proyecto se define una tasa del 7,5%, que corresponde a la tasa definida por el Banco de la República para el inicio de 2017. Este porcentaje, se tomará como referencia para el estudio.

- Valor del Tiempo

El valor del tiempo se encuentra determinado por el tiempo de trabajo de un pasajero, tiempo diferente al trabajo y tiempo de transporte de carga para los camiones.

- Costos unitarios de emisiones

Los costos por emisiones contaminantes para el modelo, desagregado en los principales contaminantes, se tomará de acuerdo con la condición a la cual están expuestas las vías de Boyacá, debido a la mayor concentración de vehículos, evaluada a partir de los siguientes contaminantes: Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Micropartículas (MP), Hidrocarburos (HC), Plomo (Pb), Óxido Nitroso (NO_x), Dióxido de Sulfato (SO₂). Lo anterior, con base en las estadísticas de la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores ANDEMOS.

- Costos de Seguridad vial

Los costos de seguridad vial se presentan en función del costo de accidentes fatales en función del PIB por persona y costos de lesiones graves como porcentaje de costo de accidentes fatales. Esta información será tomada de las bases de datos de la Encuesta Mensual del Ramo de Automóviles de la Cámara Técnica de Automóviles a través de la Federación de Aseguradoras Colombianas, Fasecolda. Otra información importante, relacionada con índices y cifras de accidentalidad, se recomienda tomarla de las bases de datos del Itboy y de los anuarios estadísticos del Departamento de Boyacá.

3.3.5. Datos de entrada de calibración en el sistema HDM-4. Así como se establecen datos de entrada adecuados para vías de Boyacá, existen factores que se encuentran determinados por las características de los vehículos y de la vía, los cuales se encuentran por defecto en el sistema HDM-4. Debido al nivel de detalle y de investigación que se requiere para calibrar los factores internos de la flota vehicular, se adoptaron los valores que recomienda el HDM-4, exceptuando los siguientes, los cuales fueron adaptados a la flota vehicular del Departamento:

- Área frontal
- Potencia: de frenado, de conducción y nominal.
- Diámetro del neumático y volumen de revestimiento del mismo.

3.3.6. Base de datos de entrada en el sistema HDM-4. Como parte del presente documento, se entregará una base de datos en formato Excel con los datos de entrada sugeridos para el sistema HDM-4 para cada uno de los 11 tipos de vehículos, donde se especifica el parámetro, valor del parámetro o dato y la fuente empleada.

En el Anexo 4, en formato Excel, se muestra la base de datos de entrada para la flota vehicular del sistema HDM-4 aplicado a los vehículos tipo en Boyacá, donde se consolidan todos los parámetros anteriormente mencionados.

La siguiente imagen muestra de manera general la organización de los parámetros para moto y vehículo liviano pequeño, la cual se extiende para los 11 tipos de vehículos definidos en el proyecto.

Figura 3.3 Organización de los parámetros para moto y vehículo liviano pequeño

Item	Nombre	Descripción	Volume 4 Reference	Moto	
				Valor o Dato	Fuente
1	VEH_NAME	Tipo de vehículo que se ha escogido	N/A	Moto	Trabajo de grado modelo RUE Boyacá
2	CATEGORY	La categoría del tipo de vehículo (motorizado o no motorizado). 0 = Motorizado (MT) 1 = No - Motorizado (NM)	E1	Categoria=0	Trabajo de grado modelo RUE Boyacá
3	BASE_TYPE	HDM-4 presenta tipos representativos de vehículos para los cuales se proveen grupos de relaciones de RUE. Existen 16 tipos de vehículos motorizados y 4 tipos de vehículos no motorizados predefinidos como estándar.	E1	Motocicleta	Trabajo de grado modelo RUE Boyacá
4	CLASS	La clase de vehículo se refiere a grupos de vehículos con características físicas, de utilización y rendimiento parecidas.	E1	Moto	Trabajo de grado modelo RUE Boyacá
5	INFO	Breve descripción del vehículo.	N/A	Yamaha BWS 125, Motor 4 tiempos, cilindraje: 125 C.C., Potencia: 9.4 HP@8.500 rpm., 2 llantas. Peso Bruto: 118 Kg.	Ficha técnica del vehículo

Fuente: Elaboración propia

3.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO RUE EN HDM-4

La calibración del modelo de RUE está enfocada en asegurar que los parámetros principales del modelo y los factores de calibración sean los apropiados para las condiciones en las que el modelo se aplica, en este caso para las vías de Boyacá. Como se describe en el capítulo 1, hay tres niveles de calibración que pueden producir diferentes niveles de tiempo y recursos. Estos son:

- Nivel 1 – Aplicación básica

Determina los valores de los parámetros básicos de entrada, adoptando muchos valores predefinidos y calibrando los parámetros más sensibles con los valores mejor estimados, a través de estudios realizados anteriormente o a partir de pequeñas encuestas de campo.

Una calibración de nivel 1 está, mayormente, basada en las fuentes secundarias; es decir, en un estudio teórico. Por ejemplo, los parámetros de RUE se pueden evaluar usando los datos de fuentes como publicaciones del gobierno y la industria, organizaciones administrativas o diferentes informes de RUE de estudios anteriores. En el deterioro de la carretera, las fuentes podrían incluir estadísticas climáticas, de estado y tráfico de la carretera, de estándares geométricos, de programas de conservación y de presupuestos.

Como se presentó en la Tabla 1.1, los siguientes datos se obtienen de una calibración de nivel 1:

- a. Costos unitarios (RUE)
- b. Algunas características de los vehículos representativos
- c. Datos del análisis económico (tasas de descuento y períodos del análisis)
- d. Características del pavimento (estudios del RDWE)
- e. Composición y tasas de crecimiento del tráfico
- f. Tipo de clima en la región

Aunque HDM-4, en ocasiones, requiere un amplio espectro de datos y parámetros de calibración, en las calibraciones de nivel 1 es necesario establecer solamente los más importantes, por lo que se utilizan frecuentemente los valores predefinidos por el software.

- Nivel 2 - Calibración

Con el fin de calibrar el pronóstico de las relaciones principales para las condiciones locales, en este nivel se requiere la medición de parámetros adicionales de entrada y encuestas de campo más avanzadas que la información requerida para el nivel 1. Este nivel puede producir ligeras modificaciones del código fuente del modelo.

Una calibración de nivel 2 usa directamente las medidas de las condiciones locales para verificar y ajustar la capacidad de pronóstico del modelo. Esto requiere un mayor grado de precisión y detalle en la recolección de datos de entrada en relación con la información de nivel 1, ya que es más rigurosa. Para el modelo RUE, por ejemplo, se concentra en la velocidad, en el consumo de combustible, neumáticos y repuestos y en los costos fijos relacionados con la utilización y la vida útil del vehículo.

- Nivel 3 - Adaptación

Se usan encuestas detalladas de campo y experimentos controlados para mejorar las relaciones de pronóstico existentes o para desarrollar nuevas relaciones locales específicas, que serán sustituidas en el código fuente del modelo.

La calibración de nivel 3 generalmente incluye dos componentes: recogida de datos mejorada e investigación fundamental.

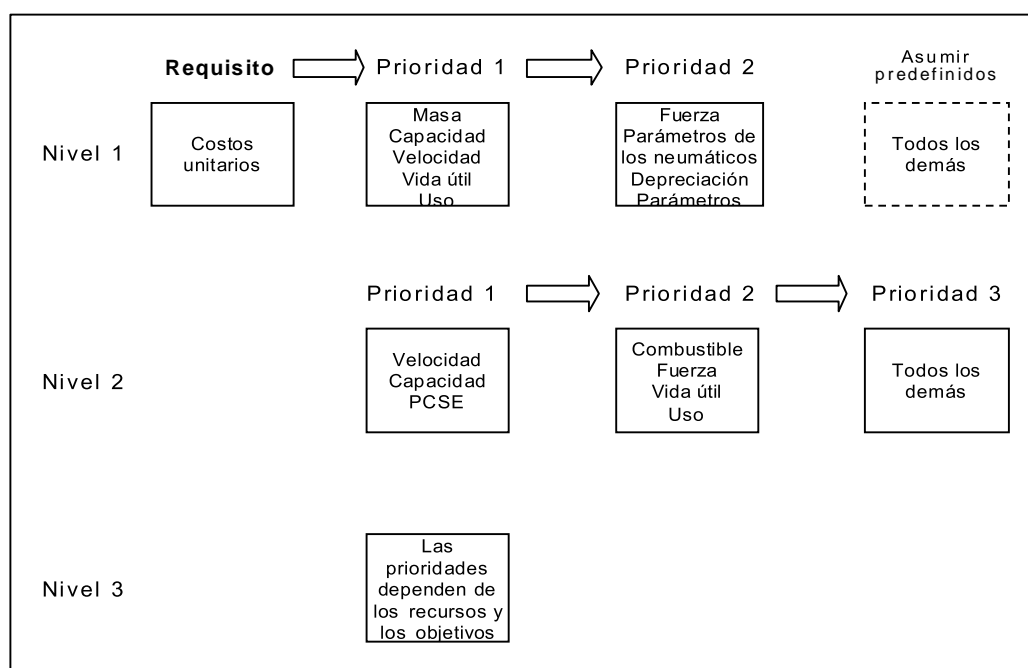
Algunos datos se pueden estimar con cierta precisión usando períodos cortos, por ejemplo, la distribución horaria del volumen del tráfico, pero se obtiene una mayor precisión recogiendo datos de diferentes lugares en largos períodos de tiempo.

La investigación fundamental considera las relaciones usadas en HDM-4. Consiste en encuestas estructuradas de campo y estudios experimentales realizados bajo condiciones locales. Por ejemplo, las funciones de cada alternativa en HDM-4 se pueden desarrollar pronosticando el consumo de combustible o el deterioro del pavimento nuevo y las funciones de los efectos de la conservación en los diferentes tipos de pavimento. Estos trabajos requieren un mayor compromiso de calidad, de investigación de campo mejor estructurada y de análisis estadístico en períodos de varios años. Por ejemplo, la investigación del deterioro del pavimento requiere un esfuerzo de varios años, generalmente de cinco años como mínimo.

Según lo indicado en el capítulo 1, esta investigación se ocupa principalmente de la calibración de nivel 1 y nivel 2 para las condiciones locales aplicado para el caso de vías en Boyacá.

La Figura 3.4 presenta las prioridades recomendadas para la calibración de RUE. Además, se muestran en orden de prioridad, los datos que son requeridos y los que se asumirán predefinidos.

Figura 3.4 Prioridades de la calibración de RUE en HDM-4



Fuente: Manuales de HDM-4

3.4.1. Calibración de variables de nivel 1 para vías de Boyacá – Aplicación básica.

A continuación, se describen las variables recomendadas para vías de Boyacá, que corresponden al nivel 1 y que son utilizadas como aplicación básica para la calibración del modelo.

3.4.1.1. Masa del vehículo: S-II. La masa del vehículo influye en la velocidad del mismo, en el consumo de combustible y neumáticos, especialmente para los vehículos de carga o camiones. Así mismo, por su asociación con el factor de deterioro del vehículo, tiene un impacto mayor en la tasa de deterioro del pavimento.

El modelo RUE del HDM-4 considera que la masa del vehículo no tiene incidencia en los pavimentos para terrenos planos. Sin embargo, teniendo en cuenta los parámetros

por defecto, en terrenos con pendientes se ha determinado que la masa provoca un aumento en el consumo de combustible, el cual es proporcional al peso del vehículo.

Es imposible obtener un estimado exacto de la masa de los vehículos sin llevar a cabo un estudio de campo, con una actividad de calibración de nivel 2. Esto, particularmente en países con pocas regulaciones de cumplimiento de la carga por eje. En estos países, frecuentemente los vehículos se cargan por encima de las especificaciones del fabricante, fijadas en PBV (Peso bruto vehicular). En HDM-4 se expresa en GVW por sus siglas en inglés (gross vehicle weight).

Según Posada J. (2012), en carreteras de Colombia se determinó el incremento que presenta el consumo de combustible cuando se eleva la pendiente de la carretera, siendo dicho consumo creciente pero no proporcional con el aumento de la pendiente. Se obtuvo que dicho efecto es mayor para condiciones de alto peso del vehículo; de igual manera, se identificó que para bajo peso del vehículo el consumo es similar para pendientes altas, a partir de 5.0% según cálculos realizados con el modelo aplicado.

En el mismo estudio se determinó que, aunque no son importantes algunas de las diferencias encontradas, se concluye en general que el consumo de combustible se incrementa de manera importante con el aumento del peso del vehículo (carga transportada) y que también influyen los aumentos de velocidad y pendiente; además que es conveniente utilizar los vehículos con la mayor cantidad de carga posible ya que se optimiza el consumo de combustible por unidad de distancia.

Para vías de Boyacá, se tendrá en cuenta las estadísticas de vehículos pesados que circulan por el departamento y realizan el paso por la ciudad de Tunja, de acuerdo con las características e información presentada más adelante.

Como es posible medir los pesos, se puede estimar la masa de los vehículos mediante una calibración de nivel 1 a partir del peso bruto del vehículo y la carga definida por el fabricante del vehículo. El software HDM-4 permite estimar mediante su análisis el porcentaje de vehículos que transitan vacíos, medio cargados, cargados y sobrecargados. La masa promedio se calcula de la siguiente manera:

$$M = \frac{[P_e TARE + P_h(0.5 TARE + 0.5 GVW) + P_f(GVW) + P_o(z_0 GVW)]}{100}$$

Donde:

M = promedio de la masa del vehículo (kg)

TARE = peso bruto del vehículo vacío (kg)

GVW = peso y carga máxima del vehículo, definido por el fabricante (kg)

P_i = porcentaje de vehículos vacíos, medio cargados, cargados y sobrecargados (%)

z₀ = peso relativo de la sobrecarga de GVW (decimal)

Esta fórmula, generalmente se aplica para camiones con remolque de 2 y 4 toneladas.

Para el caso de vías en el Departamento de Boyacá, se adopta la clasificación vehicular de transporte terrestre automotor de carga por carretera en Colombia, la cual se determina teniendo en cuenta la configuración de carga basada en la disposición de los


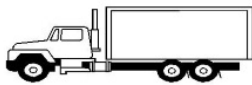

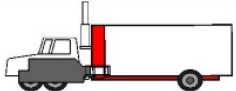
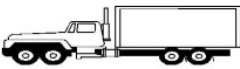
ejes. Esta clasificación fue adoptada por el Ministerio de Transporte mediante la Resolución No. 004100 del 28 de diciembre de 2004.

Para determinar la clasificación se vale de la norma técnica internacional y nacional, donde se adoptan las letras iniciales para identificar el elemento como tal; para el servicio de pasajeros se utiliza la B, para el servicio de transporte de carga se utiliza la C, para referirse a un semirremolque la S y para un remolque la R.

Se combina la primera letra con el número de ejes que tenga, por ejemplo, C2 hace referencia a un camión de dos ejes y C3 hace referencia a un camión de 3 ejes. Cuando el vehículo en cuestión tiene más de dos ejes, debemos tener en cuenta la ubicación de las ruedas directrices que en su gran mayoría están en el eje delantero.

De acuerdo con la siguiente imagen aparece el tipo C4, el cual cuenta con una disposición poco común en el medio, pero sí existe y se conoce en el sector como cuatro manos. Esta disposición característica la encontramos en los camiones Pegaso, donde las cuatro ruedas delanteras son directrices. También encontramos esta disposición en los tractocamiones como el Hyundai HD320 que con remolque queda C4R2.






Figura 3.5 Clasificación de vehículos rígidos de carga según el Ministerio de Transporte

CONFIGURACIÓN	ESQUEMA DEL VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN
C2		Camión rígido
C3		Camión rígido
C3 Tándem trasero mixto		Camión rígido
C3 Tándem direccional		Camión rígido
C4		Camión rígido

Fuente: Resolución 4100 de 2004 Ministerio de Transporte

En el caso del remolque y semirremolque se aplica de la misma forma, por ejemplo, el S1 hace referencia a un semirremolque de 1 eje y el R2 hace referencia a un remolque de 2 ejes. Si se realiza la combinación de estas dos nomenclaturas se obtiene la configuración de un tractocamión. Para dar un ejemplo C2S2, se dice que es un tractocamión de dos ejes, con un semirremolque de dos ejes.

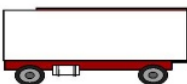


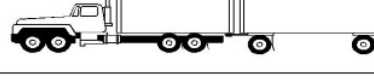
Figura 3.6 Clasificación de vehículos de carga tipo semirremolque según el Ministerio de Transporte

CONFIGURACIÓN	ESQUEMA DEL VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN
C2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje.
C2S2		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de dos ejes.
C3S1		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de un eje.
C3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes.
C3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes.

Fuente: Resolución 4100 de 2004 Ministerio de Transporte

En el caso de los remolques también se aplica la misma fórmula, de esta forma C2R2 es la denominación de un tractocamión de dos ejes, con un remolque de dos ejes y así un C3R2 es un tractocamión de dos ejes, con un remolque de dos ejes.

Figura 3.7 Clasificación de vehículos de carga tipo remolque según el Ministerio de Transporte

CONFIGURACIÓN	ESQUEMA DEL VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN
R2		Remolque.
C2 R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes.
C3 R2		Camión de tres ejes con remolque de dos ejes.
C4 R2		Camión de cuatro ejes con remolque de dos ejes.

Fuente: Resolución 4100 de 2004 Ministerio de Transporte

La flota vehicular que se recomienda tener en cuenta para el cálculo de los costos de operación vehicular y de tiempos de viaje está conformada de la siguiente manera:

Tabla 3.5 Flota vehicular para vías de Boyacá en relación con clasificación del sistema HDM-4

Código	Descripción	Tipo Base (HDM-4)
AUTOS	Automóviles y Utilitarios	Coche Pequeño
BUSES	Buses Pequeños y Grandes	Autobús Mediano
C2P	Camión de 2 ejes	Camión Ligero
C2G	Camión de 2 ejes	Camión Mediano
C3-C4	Camión de 2 ejes (simple y tándem)	Camión Pesado
C5	Camión de 3 ejes (C3-S2)	Camión Articulado
C6	Camión de 3 ejes (C3-S3)	Camión Articulado

Fuente: Elaboración propia

Estos tipos de vehículos definidos para la flota vehicular en HDM-4, corresponden a los tipos de vehículos que el Instituto Nacional de Vías INVIAS utiliza para efectuar los conteos vehiculares año a año en las carreteras colombianas. Adicionalmente, la clasificación de la flota vehicular para vías de Boyacá coincide con los criterios tomados para calcular los costos de operación vehicular por parte del INVIAS.

3.4.1.2. Factor de daño del vehículo: S-II. El factor de daño del vehículo (VDF) es una medida del daño causado al pavimento por un vehículo pesado. Es función de la configuración de los ejes y su peso. El VDF se calcula usando la ecuación de Watanatada et al., 1987a como sigue:

$$VDFVEH_k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{AX_i}{SX_i} \right)^4$$

$$VDF = \frac{\sum_{k=1}^z VDFVEH_k}{z}$$

Donde:

- VDFVEH_k = factor de daño del vehículo para el vehículo k (ESA/vehículo)
- VDF = factor de daño del vehículo para un flujo de vehículos (ESA/vehículo)
- AX_i = carga en el eje i (toneladas)
- SX_i = carga de eje estándar para el grupo de ejes j (toneladas)
- n = cantidad de ejes en el vehículo
- z = cantidad de vehículos en el flujo (congestión)



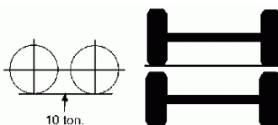


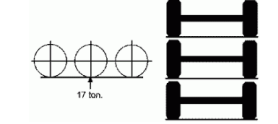
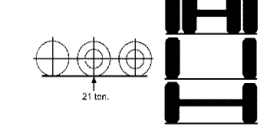
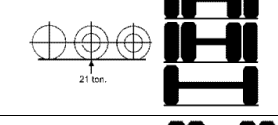
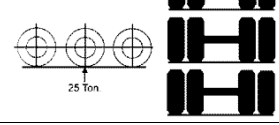
Es común dividir el flujo en clases similares de vehículos, por ejemplo, camiones medianos, pesados y articulados y calcular un VDF para cada clase.

Las cargas por eje estándar (SX_i) para las diferentes configuraciones son:

- 6,60 toneladas → rueda sencilla, eje simple
- 8,16 toneladas → rueda doble, eje simple
- 9,00 toneladas → rueda doble por eje tándem
- 15,1 toneladas → rueda doble por grupo de ejes tándem
- 10,0 toneladas → rueda doble por eje triple
- 22,9 toneladas → rueda doble por grupo de ejes triple

Para vías de Boyacá se recomienda utilizar los pesos máximos por eje en los cuales se basa el INVIAS para otorgar los permisos de transporte de carga extra pesada y extra dimensional de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 3.6 Peso máximo por eje según Resolución 4100 de 2004

TIPO DE EJE		PESO MÁXIMO POR EJE (KG)
EJE SENCILLO		
Dos llantas		6.000
Cuatro llantas		11.000
EJE TÁNDEM		
Cuatro llantas		11.000
Seis llantas		17.000
Ocho llantas		22.000
EJE TRIDEM		
Seis llantas		16.500
Ocho llantas		19.000
Diez llantas		21.500
Doce llantas		24.000

Fuente: Internet <http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/>

Con la Resolución 4100 de 2004 se establece el peso bruto vehicular a nivel nacional en el artículo 8°, el cual es modificado por la resolución 1782 de 2009 así:

Tabla 3.7 Modificación del artículo 8 de la Resolución 4100 de 2004

RESOLUCIÓN 4100 DE 2004	RESOLUCIÓN 1782 DE 2009
PESO BRUTO VEHICULAR MÁXIMO Y TOLERANCIA POSITIVA DE MEDICIÓN (KG) PARA CAMIONES 2	
16 000 – Tolerancia \pm 400	17 000 – Tolerancia \pm 425

Fuente: Resolución 1782 de 2009 Ministerio de Transporte

Hay varios puntos a tener en cuenta relacionados con el factor de daño VDF:

- Debido a la 4ª potencia del exponente en la ecuación $VDFVEH_k$, el VDF debe calcularse como el VDF promedio por vehículo en comparación con el VDF para un vehículo con peso promedio. El VDF promedio siempre es mayor que el VDF de la carga promedio.
- El VDF es la suma de todos los factores de carga por eje para todos los grupos de ejes de un vehículo, no el factor de daño de la carga promedio por eje.
- El VDF representa el VDF promedio de todos los vehículos de la misma clase en el tránsito, incluyendo los vehículos vacíos, parcialmente cargados y totalmente cargados.

Dado que los cálculos utilizan la regla de la 4ª potencia, algunos vehículos con cargas axiales grandes, pueden tener valores muy altos de $VDFVEH$. Se debe tener cuidado al incluir estos vehículos en el momento de hacer encuestas, particularmente con muestras pequeñas, ya que pueden distorsionar los resultados. Cuando se obtienen valores muy altos de VDF debido a algunos cambios en las políticas o normas de una región, estos valores tienden a ser inválidos. Un ejemplo de ello puede ser un cambio establecido por el gobierno para el cumplimiento de la carga por eje.

La clasificación vehicular recomendada para vías de Boyacá, descrita en la sección de vehículos representativos, se recomienda para el análisis de vías urbanas, especialmente para corredores viales que se encuentren dentro de las ciudades o los municipios en estudio y que sean representativos para la movilidad, como es el caso del presente trabajo de grado. Por lo tanto, con el fin de adaptar el modelo RUE para las vías de Boyacá, se realizará el análisis respectivo a partir de la información obtenida de algunos corredores viales, siguiendo la metodología recomendada para el procesamiento de información relacionada con las características de la flota vehicular y con los volúmenes vehiculares, en los cuales, se aplicará la clasificación descrita en la Tabla 3.3.

Generalmente, para obtener el tránsito promedio diario anual (TPDA), es necesario disponer del número total de vehículos que pasan durante el año por el punto de referencia, mediante aforos continuos a lo largo de todo el año, ya sea en periodos horarios, diarios, semanales o mensuales. Esta información anualmente es difícil de obtener, al menos en todas las vías, por los costos que esto implica. Debido a esto, la información primaria obtenida y que será aplicada para análisis de los corredores viales de Boyacá, proviene de aforos realizados para estudios recientes de volúmenes de tránsito realizados para tres carreteras departamentales, sin embargo, también es aplicable para las zonas urbanas, realizando la calibración de las variables de entrada.

Por otro lado, si se requiere evaluar corredores intermunicipales o carreteras nacionales, como es el caso de vías del departamento de Boyacá, en las estaciones de peajes se pueden adecuar equipos de conteos automáticos instalados en estaciones maestras como se cuenta en la gran mayoría de las carreteras de la red vial nacional. Por medio de la subdirección de valorización y peaje del INVIAS, se puede acceder a la información horaria de tránsito vehicular de las estaciones maestras de Tuta, El Roble y Albarracín, pertenecientes a los departamentos de Boyacá y Cundinamarca.

Básicamente, a manera de ejemplo y como información anexa, los archivos reportan datos horarios en el tiempo según se muestra en la Tabla 3.8. A su vez, cada uno de los archivos contiene datos reportados por el cobrador, datos registrados por el equipo y su discrepancia entre estas dos maneras de realizar el conteo horario de los vehículos.

Tabla 3.8 Información horaria vehicular de las estaciones maestras

Archivo	Sector	Duración	
		Inicio	Final
TutaTResHorario.xls	El Mortiñal – Paipa	Lunes, Enero 01 / 2017	Martes, Enero 01 / 2018
RobleTResHorario.xls	Gachancipá – Sesquilé	Martes, Abril 24 / 2017	Jueves, Abril 11 / 2018
AlbaTResHorario.xls	Villapinzón – Ventaquemada	Lunes, Enero 01 / 2017	Miércoles, Enero 02 / 2017

Fuente: Elaboración propia

Tanto para el cobrador como para el equipo se ramifican los datos según las categorías vehiculares clasificadas para las estaciones de peajes. Se debe hacer la conversión de vehículos comerciales, en su equivalencia de vehículos livianos mediante los factores equivalentes en vehículos livianos (F.E.V.L.), ver Tabla 3.9.

Como se mencionó anteriormente, este análisis se debe considerar únicamente en los casos de las vías departamentales, especialmente para el corredor Briceño – Tunja – Sogamoso. Cabe aclarar que la clasificación vehicular con respecto a la flota recomendada se diferencia en la agrupación de vehículos tipo, en razón a que la información clasificada de las estaciones maestras se agrupa de acuerdo con las 5 categorías vehiculares definidas para los peajes en Colombia. Estas categorías se encuentran resumidas en la Tabla 3.9, las cuales corresponden a CAT I – Autos, CAT II – Buses y C2, CAT III – C3, CAT IV – C5 y CAT V – C6. Por lo tanto, se requiere que el usuario del software HDM-4 realice los ajustes correspondientes a los datos de entrada para la flota vehicular de acuerdo con cada clasificación.

Tabla 3.9 Factores equivalentes de vehículos livianos, según categorías vehiculares de peajes en Colombia

Categoría	Tipo de vehículo	F.E.V.L.	Descripción
I	Autos	1.0	Automóviles, camperos, camionetas, microbuses con ejes de llanta sencilla
II	Buses y C2	2.0	Buses, busetas, microbuses con eje trasero de doble llanta y camiones de dos ejes
III	C3	2.5	Vehículos de pasajeros y de carga de tres y cuatro ejes
IV	C5	2.5	Vehículos de carga de cinco ejes
V	C6	2.5	Vehículos de carga de seis ejes
Eje Grúa	Eje Grúa	1.0	-

Fuente: CAL, Rafael - R, Mayor. Manual de Planeación y Diseño para la administración de tránsito y transporte en la ciudad de Bogotá

Teniendo en cuenta la información suministrada para procesar los datos de los volúmenes vehiculares para los corredores de análisis para vías de Boyacá y debido a la calidad de la información almacenada en las hojas electrónicas, se depuró la información contenida en los archivos. Para depurar esta serie de datos fue necesaria la creación de una hoja de cálculo adicional que mediante su programación permitió filtrar esta información hasta llevarla a una serie ordenada del volumen horario como porcentaje del TPDA versus una serie ordenada del número de horas durante las 8760 horas del año.

Finalmente, para una calibración de nivel 1, el VDF se estima utilizando los porcentajes asumidos de vehículos vacío, medio lleno, llenos y sobrecargados. Se debe realizar un análisis de sensibilidad con HDM para probar la sensibilidad de los resultados al aplicar los valores estimados.

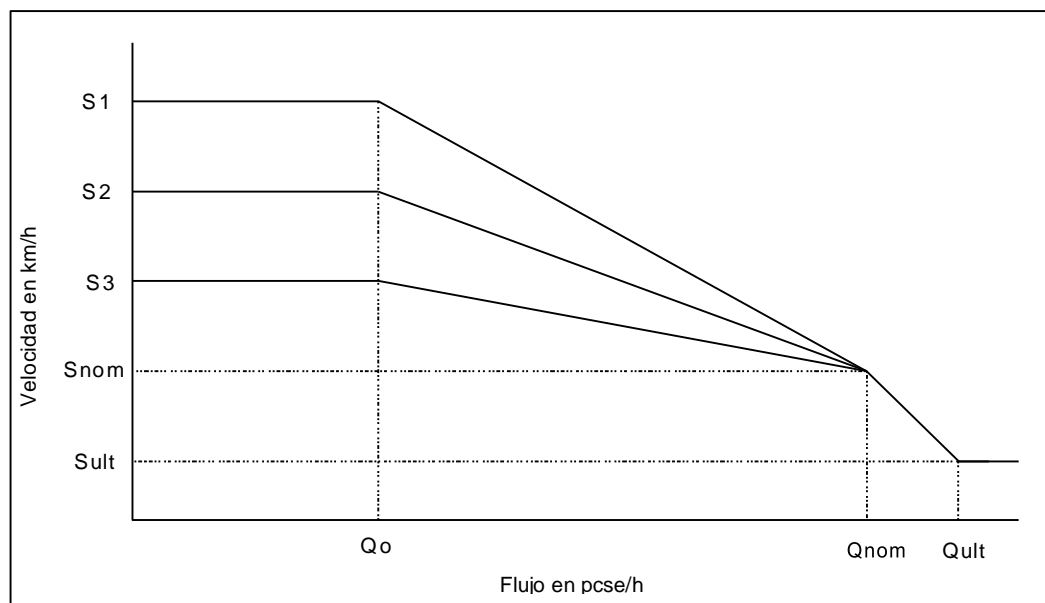
Es importante tener en cuenta que la fórmula de estimación del peso del vehículo y del VDF de nivel 1, producirá solamente valores generales. Únicamente se obtendrán valores estimados precisos de esos parámetros al realizar encuestas de campo.

3.4.1.3. Datos de la capacidad y de la relación flujo-velocidad. HDM-4 utiliza el modelo de relación flujo-velocidad propuesto por Hoban (1987) que se muestra en la Figura 3.8. Este modelo requiere cinco parámetros principales de entrada:

- a. Qult – capacidad máxima de la carretera
- b. Qnom – capacidad nominal cuando todos los vehículos viajan a la misma velocidad
- c. Qo - flujo cuando comienzan las interacciones
- d. Snom – velocidad a la capacidad nominal
- e. Sult – velocidad a la máxima capacidad

La Tabla 3.10 presenta los valores de los parámetros predefinidos en HDM-4.

Figura 3.8 Modelo de la relación flujo/velocidad en HDM-4



Fuente: Paquete de documentación de HDM-4

Tabla 3.10 Parámetros predefinidos del modelo de relación capacidad-velocidad en HDM-4

Tipo de carretera	Ancho (m)	Qo/Qult	Qnom/Qult	Qult (PCSE/h)	Sult (km/h)
Carretera de carril sencillo	< 4	0,0	0,70	600	10
Carretera intermedia	4 a 5,5	0,0	0,70	1800	20
Carretera de dos carriles	5,5 a 9	0,1	0,90	2800	25
Carretera ancha de dos carriles	9 a 12	0,2	0,90	3200	30
Carretera de cuatro carriles	>12	0,4	0,95	8000	40

Fuente: Hoban et al. (1994)

La capacidad de una carretera se define como la tasa máxima de flujo por hora en la que se espera que los vehículos atraviesen un punto o tramo uniforme de carretera en condiciones predominantes de tráfico y control. Aunque siempre se considera como un valor sencillo fijo, siempre existen variaciones inherentes debidas a factores como el comportamiento del conductor, el rendimiento del vehículo y las condiciones predominantes, por lo tanto, se debe calcular una capacidad promedio que adopte estas variaciones.

Para una calibración de nivel 1, se pueden adoptar como predefinidos los valores de la Tabla 3.10. No obstante, estas son capacidades ideales y, por lo tanto, se recomiendan ajustar para reflejar las condiciones típicas de la operación. Por ejemplo, el HCM reduce la capacidad ideal en diferentes divisiones direccionales (ejemplo 60/40 en lugar de la ideal 50/50) y la presencia de zonas de adelantamiento prohibido. Estas reducciones pueden ser bastante significativas, reduciendo la capacidad ideal en un 20% o más.

Los factores de reducción de capacidad del HCM para carreteras de dos carriles se muestran en la Tabla 3.11. Estos factores se pueden aplicar para una calibración de nivel 1, aunque con precaución, ya que pueden no ser totalmente apropiados para las condiciones a las que fueron desarrolladas. La capacidad ideal se multiplica por estos factores para reducirla a un valor que refleje las condiciones reales de operación.

Tabla 3.11 Factores de reducción de la capacidad por zonas de adelantamiento prohibido en carreteras de dos carriles

Terreno	Factor de reducción por porcentaje de zonas prohibidas					
	0	20	40	60	80	100
Llano	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Irregular	0,97	0,94	0,92	0,91	0,90	0,90
Montañoso	0,91	0,87	0,84	0,82	0,80	0,78

Fuente: HCM (1997)

Tabla 3.12 Factores de reducción de la capacidad por porciones direccionales en carreteras de dos carriles

Factor de reducción por porciones direccionales					
100/0	80/10	80/20	70/30	60/40	50/50
0,71	0,75	0,83	0,89	0,94	1,00

Fuente: HCM (1997)

Tabla 3.13 Factores de reducción de la capacidad por ancho del carril y berma en carreteras de dos carriles

Ancho utilizable de berma (m)	Factor de reducción de la capacidad por ancho de carril (m)			
	3,6	3,3	3,0	2,7
≥ 1,8	1,00	0,94	0,87	0,76
≥ 1,2	0,97	0,92	0,85	0,74
≥ 0,6	0,93	0,88	0,81	0,70
0	0,88	0,82	0,75	0,66

Fuente: HCM (1997)

Teniendo en cuenta que la fuente del HDM-4 es el HCM de 1997 como recomendación para vías de Boyacá, se propone la metodología establecida en el manual de capacidad y niveles de servicio aplicado al caso colombiano (Cerquera, Flor A., 2007). Para esta tesis de grado, se propuso la elaboración de una hoja electrónica donde se consigna la metodología de este manual para varios tipos de vías, que dependen esencialmente de las condiciones de la sección transversal de la vía de acuerdo con las siguientes tablas.

Tabla 3.14 Factores de correlación a la capacidad por pendiente (Fpe)

Pendiente Ascendente %	Longitud de la pendiente (Km)					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
2	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97
3	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95
4	0.98	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94
5	0.98	0.95	0.94	0.92	0.92	0.92
6	0.97	0.95	0.92	0.91	0.91	0.90
7	0.96	0.93	0.91	0.89	0.89	0.87
8	0.96	0.92	0.89	0.97	0.86	0.85
9	0.94	0.89	0.85	0.83	0.82	0.81
10	0.92	0.85	0.81	0.79	0.78	0.77
11	0.90	0.81	0.76	0.73	0.72	0.71
12	0.87	0.76	0.71	0.68	0.67	0.64

Fuente: Manual de capacidad y niveles de servicio

Tabla 3.15 Factores de correlación a la capacidad por distribución por sentido (Fd)

Distribución por sentido A/D	Porcentaje de zonas de no rebase					
	0	20	40	60	80	100
50/50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60/40	0.90	0.89	0.87	0.86	0.85	0.83
70/30	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.71
80/20	0.75	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63
90/10	0.69	0.66	0.64	0.61	0.58	0.56
100/0	0.64	0.61	0.58	0.56	0.53	0.50

Fuente: Manual de capacidad y niveles de servicio

Tabla 3.16 Factores correlación a la capacidad por efecto combinado de ancho de carril y berma (Fcb)

Ancho utilizable de la berma en metros	Ancho de carril (m)				
	3.65	3.50	3.30	3.00	2.70
1.80	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92
1.50	0.99	0.99	0.98	0.95	0.91
1.20	0.99	0.98	0.97	0.95	0.91
1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.90
0.50	0.98	0.97	0.96	0.93	0.89
0.00	0.97	0.96	0.95	0.92	0.88

Fuente: Manual de capacidad y niveles de servicio

Una vez establecidos los tramos a trabajar, junto con sus características, se elaboraron las curvas del modelo de la relación flujo/velocidad, las cuales establecen los flujos en los que culmina la capacidad de tráfico libre (Q_0), la capacidad nominal (Q_{nom}) y la capacidad última (Q_{ult}) o capacidad de atascamiento, para cada uno de los casos que se requieran, por medio de los puntos de inflexión que define el modelo. Estas curvas se presentan en el Anexo 6 que corresponde a las tablas de análisis de sensibilidad.

3.4.1.4. Promedio de vida útil: S-II. Un vehículo o cualquier propiedad física, tiene tres medidas de su vida:

- Vida útil – es el período durante el cual se opera el vehículo
- Vida física – es el período en el que el vehículo existe (aunque no se utilice)
- Vida económica – es el período en el que el vehículo es económicamente rentable para operar

En HDM-4 solo se considera la vida útil. El software HDM-4 la utiliza para calcular los costos de depreciación de los vehículos que pueden tener un impacto significativo en el modelo RUE.

En el sistema HDM-4 es necesario definir la vida útil esperada en km para un vehículo que opera en un pavimento flexible. Este valor se usa para determinar el efecto de la regularidad en la vida útil, cuando se usa una técnica “**Optimal Life**” (vida óptima o vida útil). La vida útil esperada es la distancia total recorrida en la cual es recomendable desechar el vehículo.

Existen diferentes técnicas para calcular la vida útil. Según lo propuesto por Winfrey (1969), en una calibración de nivel 1 se deben obtener las edades de una muestra de vehículos, bien sea por una pequeña encuesta o por un muestreo a través de anuncios de vehículos en venta. Por su parte, Daniels (1974) indica que la vida útil resultará de duplicar la edad promedio.

De acuerdo con las fichas técnicas de los vehículos tipo recomendados para la flota vehicular en Boyacá, así como la información contenida en la página web carroya.com, que es un portal para la publicación de anuncios de carros y motos en venta, se determinan los años de vida útil para los vehículos pequeños incluyendo motos. Para el caso de los buses se sugiere tener en cuenta el valor en años recomendado por la Ley 105 de 1993 del Ministerio de Transporte en el artículo 6° inciso 1°, donde se establece la vida útil máxima de los vehículos terrestres de servicio público colectivo de pasajeros y/o mixto. En cuanto a los vehículos de carga, se recomienda tomar como referencia el

Proyecto de Ley (en trámite) por la cual se adoptan mecanismos para la reposición del parque automotor de servicio público de transporte en su Capítulo II artículo 6°. De esta manera, se sugieren los siguientes valores:

Tabla 3.17 Valor promedio de vida útil del vehículo, expresada en años

Tipo de vehículo	Vida útil	Fuente
Moto	8 Años	Clasificados http://www.carroya.com y Manual HDM-4 Volumen 5
Taxi	10 Años	Clasificados http://www.carroya.com y Manual HDM-4 Volumen 5
Vehículo Liviano Particular	10 Años	Clasificados http://www.carroya.com y Manual HDM-4 Volumen 5
Utilitario	10 años	Clasificados http://www.carroya.com y Manual HDM-4 Volumen 5
Bus Liviano	20	Ley 105 /1993
Bus Mediano	20	Ley 105 /1993
Bus Grande	20	Ley 105 /1993
Camión 2 ejes pequeño	35	Proyecto_Reposición_Parque_Automotor
Camión 2 ejes Grande	35	Proyecto_Reposición_Parque_Automotor
Camión 3 y 4 ejes pesado	35	Proyecto_Reposición_Parque_Automotor
Camión articulado	35	Proyecto_Reposición_Parque_Automotor

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.5. Uso del vehículo: S-II/S-III.

- Uso anual – número de kilómetros conducidos

El kilometraje anual, es decir, la cantidad de kilómetros recorridos por año, se utiliza para calcular el consumo de partes y los costos de interés.

Para determinar el kilometraje anual es necesario tener información detallada de las edades de los vehículos y de las distancias que han recorrido. La utilización de un vehículo generalmente varía con la edad, por lo tanto, es importante que los datos recopilados no estén sesgados a favor de los vehículos de una determinada edad.

Para una calibración de nivel 1, es recomendable la utilización de una fuente de datos originada de la publicidad de vehículos en venta o también de periódicos u otras fuentes similares que suelen ofrecer datos del año y del kilometraje total de una muestra de vehículos usados. Dividiendo el kilometraje por la edad, se obtiene el kilometraje promedio del vehículo durante su vida. Se pueden presentar problemas con vehículos muy antiguos ya que su odómetro puede haber sobrepasado los 100.000 km o las edades pueden estar erróneas. No obstante, si se obtiene una muestra suficientemente amplia, estos problemas se minimizan.

El cálculo de los kilómetros y horas conducidas se presenta en el Anexo 8.

- Utilización horaria anual – número de horas por año

Existen tres definiciones para la utilización horaria:

- a. HAV – número de horas en el que el vehículo está disponible por año: es el número de horas por año (8760), menos el tiempo permitido para el descanso del conductor, el tiempo perdido en la carga, en la descarga, en el reabastecimiento de combustible, en la búsqueda de la carga, en las reparaciones, etc.

- b. HRD – número de horas conducidas: horas en las que el vehículo es operado. Se puede calcular a partir del kilometraje anual dividido por la velocidad promedio anual.
- c. HWK – número de horas trabajadas: es similar a las horas conducidas (HRD) excepto porque se incluye el tiempo empleado en la carga, en la descarga y en el reabastecimiento del combustible.

El modelo de utilización de HDM-4 se basa en el enfoque de horas trabajadas.

Usando una semana de trabajo estándar, generalmente un vehículo está disponible aproximadamente 1800 horas por año. Sin embargo, dado que hay períodos sustanciales de tiempo en los que el vehículo no está en uso, por ejemplo, en los períodos de carga y descarga, el tiempo de conducción podría ser inferior al 50% de este valor. Los camiones y los buses tienen la mayor utilización y los vehículos tipo utilitarios la menor.

Como se explica en Bennett (1995), es importante que el valor adoptado para las horas conducidas sea consistente con la utilización anual y con la velocidad promedio. En caso contrario, los costos previstos podrían distorsionarse. De esta manera, se recomienda que, a falta de información detallada, las horas conducidas se calculen usando la siguiente ecuación:

$$HRD = \frac{AKM}{S0}$$

Donde:

AKM = utilización anual promedio en km

S0 = velocidad promedio de operación en km

Para calcular las horas trabajadas es necesario tener datos suficientes para identificar los tiempos empleados en realizar las operaciones necesarias requeridas por un viaje completo en circunstancias normales. No se debe incluir el tiempo empleado por los conductores en el consumo de alimentos, en el descanso o en otras actividades no relacionadas con el trabajo.

El tiempo empleado en las reparaciones del vehículo, por lo general también debe excluirse ya que no se considera parte de un viaje. Por el contrario, se debe incluir el tiempo empleado en la conducción, en la carga y descarga, y en el reabastecimiento de combustible.

Se podría también incluir el tiempo administrativo que el conductor ha empleado para buscar cargas o el tiempo que puede emplear esperando con su vehículo para mover la carga. En ciertas circunstancias, no todo el tiempo de carga es tiempo de trabajo, por ejemplo, si el conductor detiene el vehículo para descansar o dormir mientras que su vehículo está cargado.

El tiempo de trabajo se establece realizando pequeñas encuestas que incluyan las actividades del vehículo en varios días.

La metodología utilizada y el cálculo realizado para la determinación de estos factores se incluye en el Anexo 8.

- Porcentaje de uso privado

El porcentaje del uso privado del vehículo se puede establecer únicamente realizando pequeñas encuestas a los usuarios. Estas encuestas definen los viajes de trabajo y los viajes privados. Los valores resultantes se usan para calcular el valor del tiempo de viaje.

Para establecer los valores de uso del vehículo recomendados para vías de Boyacá, se pueden tomar como referencia algunos estudios representativos de otras regiones de Colombia relacionados con estas variables. Para el caso práctico a presentar en el desarrollo de la presente tesis de grado, teniendo en cuenta que, se han adelantado pocos estudios acerca de estos parámetros, se toman como referencia valores registrados en el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali-Yumbo; estudio incluido en la revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia que contiene el número de vehículos y la distancia recorrida por cada tipo de vehículo. También se consultaron otras fuentes que incluyen datos de kilómetros recorridos y número de pasajeros para el 2009 de acuerdo con un estudio adelantado por la Secretaría de Movilidad de Bogotá, por lo tanto, se relacionan estos valores con los del inventario de la zona de Cali – Yumbo y se adoptan los valores presentados en la Tabla 3.15. Para los datos restantes, se tuvo en cuenta el registro de indicadores de velocidad según lo establecido por la Secretaría de Movilidad de Bogotá y otros datos asumidos por defecto, tomados del Manual HDM-4 Volumen 5.

Tabla 3.18 Parámetros de uso de vehículos en Boyacá para análisis en RUE

Variable / descripción	AKMO		HRWKO		PP	
	Valor promedio de kilómetros recorridos por un vehículo en un periodo de un año.		Valor base promedio del número de horas del vehículo trabajadas durante un año.		Porcentaje del uso del vehículo en viajes privados (diferente a trabajo).	
Tipo de vehículo	Valor o Dato	Fuente	Valor o Dato	Fuente	Valor o Dato	Fuente
Moto	15560 km/año	Revista Facultad de ingeniería de la Universidad de Antioquia "Figura 2"	615 horas anuales	Manual HDM-4 Volumen 5- Indicadores de velocidad SDM	100%	Asumido con base en Manual HDM-4 Volumen 5
Taxi	87360 km/año	Asumido con base en Manual HDM-4 Volumen 5	3626 horas anuales		7%	
Vehículo Liviano Particular	20000 km/año		791 horas anuales		100%	
Utilitario	20000 km/año	Archivo: Datos kilómetros recorridos y número de pasajeros 2009 SDM	791 horas anuales		100%	
Bus Liviano	47100 Km/año		2479 horas anuales		0	
Bus Mediano	47184 km/año		2483 horas anuales		0	
Bus Grande	47760 km/año		2514 horas anuales		0	
Camión 2 ejes pequeño	46670 km/año		2456 horas anuales		0	
Camión 2 ejes Grande	43330 km/Año	Revista Facultad de ingeniería de la Universidad de Antioquia	2281 horas anuales		0	
Camión 3 y 4 ejes pesado	20000 km/año		1235 horas anuales		0	
Camión articulado	20000 km/año		1235 horas anuales		0	

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.6. Parámetros del modelo de predicción de velocidad: S-II/S-III. El modelo de predicción de la velocidad en HDM-4 es mecánico y se basa en principios físicos y cinemáticos, así como las restricciones de comportamiento. En consecuencia, el modelo físico básico es altamente cambiante y el objetivo de la calibración de nivel 1 debe ser definido por las restricciones de comportamiento, así:

- VDESIR – Velocidad deseada de viaje

VDESIR representa la velocidad máxima de viaje adoptada por el conductor de un vehículo cuando no existen otras restricciones físicas, tales como pendientes, curvatura, regularidad o congestión, que rigen la velocidad de desplazamiento. El valor de VDESIR está influenciado por el comportamiento del conductor en respuesta a consideraciones psicológicas, de seguridad, culturales y económicas, además de factores tales como ancho de la carretera, rozamiento de la carretera, presencia de transporte no motorizado y límites de velocidad. Por lo general, es considerablemente diferente entre distintos países e incluso entre regiones del mismo país, por lo tanto, se recomienda calibrarlo para las condiciones locales sin adaptarlos de otros estudios.

- β – el “límite”

Indica qué tan lejos del límite de la velocidad está la velocidad estimada. β es el **Parámetro de forma Weibull** y está funcionalmente relacionado con la dispersión del perfil de distribución de las velocidades restringidas.

Para fines de calibración, el modelo de velocidad de HDM-4 predice un mínimo probable de cinco velocidades restringidas basadas en: fuerza, frenado, curvatura, regularidad y velocidad deseada.

Como se muestra en la Figura 3.9, cuando β se acerca a cero, la velocidad media de un tramo de carretera dado, sería igual al mínimo de las cinco velocidades restringidas. Para un mayor valor de β , se producirá una mayor velocidad media estimada de las velocidades restringidas. Por lo tanto, si la velocidad deseada es de 100 km/h, con un valor de $\beta=0$, la velocidad estimada sería de 100 km/h. Sin embargo, si se utiliza un valor distinto de cero para β , la velocidad estimada sería inferior a 100 km/h.

Debido a la variabilidad encontrada para los diferentes estudios, la cuantificación de β requiere un estudio de campo detallado, es decir, una calibración de nivel 2.

Al realizar una calibración de VDESIR, se sugiere considerar en conjunto con el valor de β . Si los valores predeterminados de β dan como resultado valores de VDESIR que son marcadamente más altos que la velocidad estimada, el valor de β debe aumentarse con respecto al valor predeterminado.

Para una calibración de nivel 1, cuando no se requiere el valor de ahorro de tiempo de viaje, se recomienda utilizar las velocidades libres promedio predeterminadas para cada clase de vehículo, las cuales son adecuadas y no alteran el modelo.

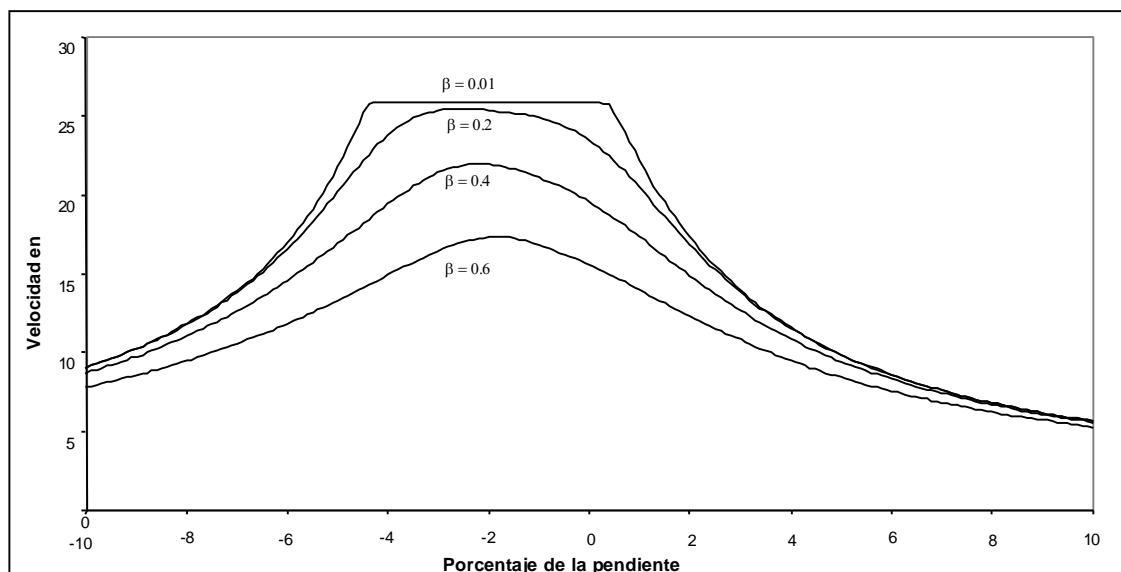
El sistema HDM-4 debe ejecutarse en un tramo de vía con características promedio que reflejen las condiciones para la velocidad promedio estimada. La velocidad libre estimada debe compararse con la velocidad promedio estimada y con el valor de VDESIR usado en la modelación. Si se utilizan varios tramos de vías en el análisis, el valor de VDESIR debe ser establecido alternativamente usando este método para cada tramo y posteriormente esos valores deberán ser promediados (si existen grandes

diferencias entre los valores de VDESIR puede ser recomendable eliminar el perfil mayor y revisar las velocidades estimadas). Como se describió anteriormente, también puede ser necesario ajustar el valor de β para asegurar un valor razonable de VDESIR.

Para vías de Boyacá se recomienda adoptar los valores predefinidos en HDM-4 de acuerdo con la Tabla 3.19 afectados por un factor de reducción que representen adecuadamente los límites de velocidad máxima de viaje para la flota vehicular de la ciudad. Lo anterior, teniendo en cuenta que las velocidades máximas predefinidas en HDM-4 son determinadas para el sistema de carreteras de Estados Unidos que cuenta básicamente con autopistas interestatales en donde se establecen límites de velocidad razonables acorde con las condiciones del medio ambiente, del tráfico y de las carreteras o avenidas y que, para ser adoptadas localmente, estas difieren de manera significativa en comparación con las vías urbanas de una ciudad colombiana.

Para ajustar estos valores de velocidad máxima, es necesario referirse a la Ley 1239 de 2008 que modifica el artículo 106 del Código Nacional de Tránsito y fija los límites de velocidad en las carreteras nacionales, departamentales, distritales y municipales de Colombia. En esta Ley se establece que en las vías urbanas las velocidades máximas y mínimas para vehículos de servicio público o particular será determinada y debidamente señalizada por la autoridad de Tránsito competente en el distrito o municipio respectivo y en ningún caso podrá sobrepasar los 80 kilómetros por hora, por lo tanto, para vías de Boyacá se recomienda utilizar un factor de reducción que se limite a este valor de 80 km.

Figura 3.9 Efecto de β en la velocidad pronosticada en HDM-4



Fuente: Bennett y Greenwood, 1999

En cuanto al límite de velocidad para los vehículos de servicio público, de carga y de transporte escolar, fijado en 60 kilómetros por hora y velocidad en zonas escolares y en zonas residenciales establecida hasta en 30 kilómetros por hora, al igual que para los vehículos livianos, se recomienda utilizar factores de reducción que representen estos valores definidos para las carreteras colombianas.

Tabla 3.19 Parámetros predefinidos de VDESIR en HDM-4

Número de vehículo	Velocidad deseada					
	(Carreteras de capa asfáltica)					
	VDES2 (m/s)	VDES_a0	VDES_a1	VDES_a2	CW1	CW2
1	40	0,002	2,9	0,75	4	6,8
2	40,1	0,002	2,9	0,75	4	6,8
3	34,8	0,002	2,9	0,75	4	6,8
4	34,4	0,002	2,9	0,75	4	6,8
5	42	0,002	2,9	0,75	4	6,8
6	40	0,002	2,9	0,75	4	6,8
7	39,2	0,002	2,9	0,75	4	6,8
8	35,6	0,0028	0,7	0,75	4	6,8
9	29,3	0,0028	0,7	0,75	4	6,8
10	24,6	0,0033	0,7	0,75	4	6,8
11	29,1	0,0039	0,7	0,75	4	6,8
12	46,1	0,002	0,6	0,75	4	6,8
13	34,4	0,0028	0,6	0,75	4	6,8
14	39,4	0,0028	0,6	0,75	4	6,8
15	24,8	0,0033	0,6	0,75	4	6,8
16	24,5	0,0033	0,6	0,75	4	6,8

Fuente: Bennett y Greenwood, 1996

Tabla 3.20 Valores recomendados de VDESIR para vías de Boyacá

Tipo de vehículo	Valor de HDM-4		Factor de reducción recomendado (%)	Valores adoptados	
	VDESIR (m/s)	VDESIR (km/h)		VDESIR (m/s)	VDESIR (km/h)
Moto	40	144,00	50%	20,0	72,00
Taxi	40,1	144,36	55%	18,0	64,96
Vehículo Liviano Particular	34,8	125,28	50%	17,4	62,64
Utilitario	39,2	141,12	50%	19,6	70,56
Bus Liviano	34,4	123,84	50%	17,2	61,92
Bus Mediano	37,4	134,64	50%	18,7	67,32
Bus Grande	24,8	89,28	50%	12,4	44,64
Camión 2 ejes pequeño	35,6	128,16	55%	16,0	57,67
Camión 2 ejes Grande	29,3	105,48	50%	14,7	52,74
Camión 3 y 4 ejes pesado	24,6	88,56	50%	12,3	44,28
Camión articulado	29,1	104,76	60%	11,6	41,90

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.7. Potencia empleada durante la conducción del vehículo: S-III. La potencia de conducción solo tiene un efecto significativo en las velocidades cuando la pendiente es positiva y mayor del 4% para vehículos livianos y del 2% al 3% para vehículos pesados. Para una calibración de nivel 1, la potencia utilizada puede estimarse a partir de los atributos del vehículo usando las siguientes ecuaciones:

- Vehículos diésel

$$HPDRIVE = 0.70 HPRATED$$

Donde:

HPDRIVE = potencia de conducción usada (kW)

HPRATED = potencia máxima nominal del motor en escala SAE (kW)

Esta ecuación se aplica a vehículos de tecnología antigua (es decir, anterior a 1985). Para HPDRIVE se utilizan conversiones de la potencia del motor: 1 BHP = 0,746 kW; 1 MPH = 0,736 kW; 1 BHP = 0,987 MPH. Bennett (1994) indicó que para vehículos modernos se puede utilizar un factor de 0,75, basado en que los vehículos grandes tienden a usar más potencia. Por lo anterior, se desarrolló la siguiente ecuación alternativa relacionando la potencia con el peso:

$$\text{HPDRIVE} = (8.5 \times 10^{-6} M + 0.53) \text{HPRATED}$$

- Vehículos a gasolina

$$\text{HPDRIVE} = 1.8 \text{HPRATED}^{-0.3}$$

Antes de 1985

$$\text{HPDRIVE} = 2.0 \text{HPRATED}^{-0.3}$$

Posteriores a 1985

Al aplicar estas ecuaciones, se debe tener en cuenta que existe una relación entre la pendiente y el uso de energía con vehículos que tienen un mayor uso de energía en pendientes mayores. Por lo tanto, puede ser necesario aumentar la potencia de conducción usando las ecuaciones anteriores para los vehículos que operan en condiciones montañosas.

De acuerdo con los valores registrados en la Tabla 3.21 correspondientes a los parámetros predefinidos de HPDRIVE en HDM-4, se recomienda para un nivel de calibración 1, adoptar estos mismos valores para vías de Boyacá como se indica en la Tabla 3.22.

Tabla 3.21 Parámetros predefinidos de PDRIVE en HDM-4

Vehículo número	Parámetros del modelo		VDRIVE	VBRAKE			
	SPEED_ SIGMA α	SPEED_BETA β	PDRIVE (kW)	PBRAKE (kW)	CGR_a0	CGR_a1	CGR_a2
1	0	0,151	12	5	94,9	0,85	2,8
2	0	0,151	26	20	94,9	0,85	2,8
3	0	0,151	33	20	94,9	0,85	2,8
4	0	0,151	36	20	94,9	0,85	2,8
5	0	0,151	40	25	94,9	0,85	2,8
6	0	0,151	40	20	94,9	0,85	2,8
7	0	0,151	45	25	94,9	0,85	2,8
8	0	0,191	50	45	94,9	0,85	2,8
9	0	0,164	87	70	94,9	0,85	2,8
10	0	0,11	227	255	94,9	0,85	2,8
11	0	0,11	227	255	94,9	0,85	2,8
12	0	0,151	40	26	94,9	0,85	2,8
13	0	0,191	50	45	94,9	0,85	2,8
14	0	0,191	65	70	94,9	0,85	2,8
15	0	0,11	120	120	94,9	0,85	2,8
16	0	0,11	180	180	94,9	0,85	2,8

Fuente: Bennett y Greenwood, 1996

Tabla 3.22 Valores recomendados de PDRIVE para vías de Boyacá

Tipo de vehículo	PDRIVE (kW)	SPEED_BETA β	Fuente
Moto	12	0,151	Manual HDM-4. Volumen 4
Taxi	26	0,151	
Vehículo Liviano Particular	33	0,151	
Utilitario	45	0,151	
Bus Liviano	50	0,191	
Bus Mediano	65	0,191	
Bus Grande	120	0,110	
Camión 2 ejes pequeño	50	0,191	
Camión 2 ejes Grande	87	0,164	
Camión 3 y 4 ejes pesado	227	0,110	
Camión articulado	227	0,110	

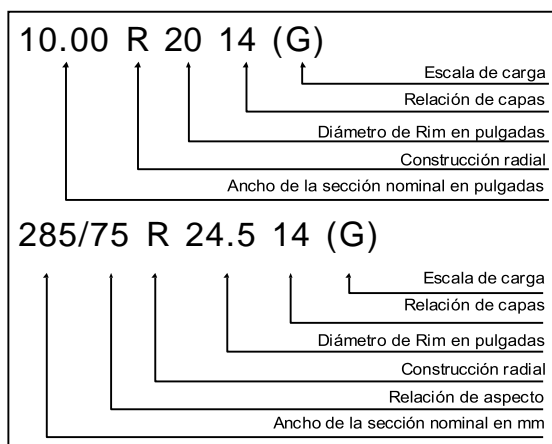
Fuente: Elaboración propia

3.4.1.8. Tipo de neumático, diámetro de rueda y número de ruedas: S-IV. El tipo de neumático y el número de ruedas se usan en HDM-4 para establecer la resistencia a la rodadura. Los neumáticos de capa diagonal ofrecen una mayor resistencia a la rodadura en relación con los neumáticos radiales, y la resistencia aumenta a medida que aumenta el diámetro de la rueda y el número de ruedas.

El tamaño de los neumáticos tiene una nomenclatura estándar. Los dos tipos más comunes se indican en la Figura 3.10 que incluye una descripción de lo que significa cada término. La nomenclatura superior es común en los neumáticos para camiones y se basa en el ancho de la sección nominal expresada en pulgadas. La segunda se usa para todos los vehículos e indica el ancho de la sección nominal en mm y la relación de aspecto del ancho de la sección del neumático (la relación de aspecto representa la altura de la sección del neumático o distancia desde el borde hasta el centro de la banda de rodadura en el ancho de la sección). Una relación de aspecto de 65 significa que la altura de la sección del neumático es el 65% del ancho de la sección del neumático.

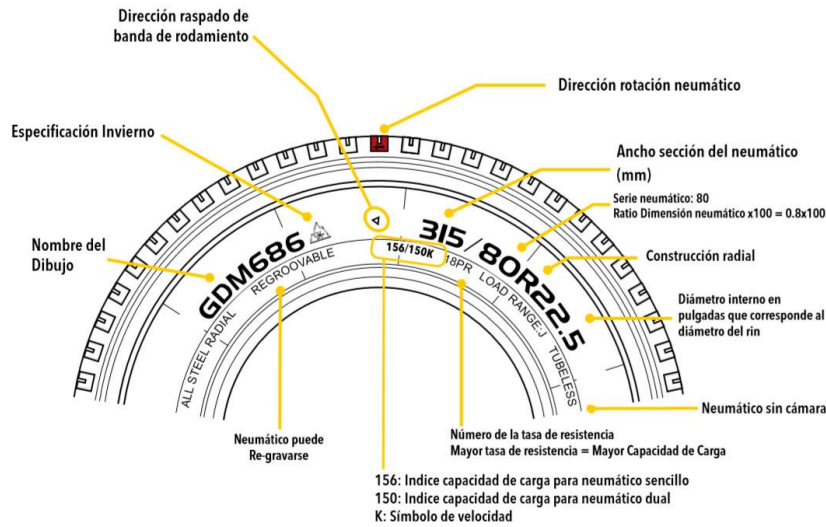
Para mayor claridad, el ancho de la sección se separa de la relación de aspecto mediante una barra inclinada (/). Una nomenclatura menos común, utiliza el ancho nominal en pulgadas y la relación de aspecto, separados por una barra inclinada, por ejemplo 14/80R20. El ancho de la sección en unidades imperiales se puede convertir de pulgadas a milímetros usando el factor 1" = 25,4 mm.

Figura 3.10 Nomenclatura estándar de los neumáticos en HDM-4



Fuente: Manuales de HDM-4

Figura 3.11 Lectura estándar de una llanta



Fuente: <http://www.mercallantas.com.co/project/giticomfort-228v1/>

La cantidad de bandas y la escala de carga, generalmente solo se aplica a neumáticos de vehículos pesados, por lo que la nomenclatura estándar se reduce a:

$$xxx/yyRzz$$

Donde:

Xxx = ancho nominal del neumático (mm)

yy = relación de aspecto

zz = tamaño de la llanta (pulgadas)

Para vehículos livianos, la relación de aspecto de 82 frecuentemente se omite, por ejemplo, se debe especificar 175/R13 en lugar de 175/82R13. El valor de 82 cuando se omite, se puede suponer para vehículos pesados.

El tipo de neumático puede determinarse a partir de las especificaciones del fabricante, ya que los conductores suelen comprar los mismos neumáticos para recambio que aquellos adquiridos de fábrica para vehículos nuevos. Alternativamente, se puede llevar a cabo un pequeño estudio que registre los neumáticos en una muestra de vehículos, por ejemplo, en un estacionamiento o en una tienda para camiones.

Para la calibración de nivel 1, el diámetro de la rueda puede estimarse a partir de la nomenclatura de neumáticos usando la siguiente ecuación (Greenwood, 1997):

$$DIAM = 25.4 zz + 2 xxx \frac{yy}{100}$$

El número de ruedas puede estimarse a partir de las especificaciones del fabricante o a partir de un pequeño estudio.

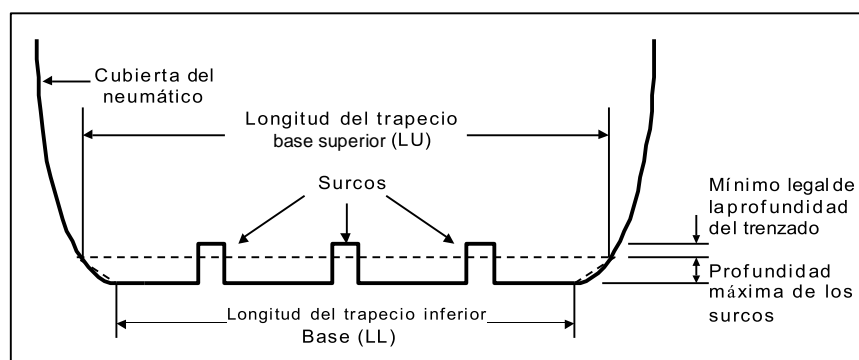
Tabla 3.23 Tipo de neumático, diámetro y número de ruedas para vías de Boyacá

Variable / descripción Tipo de vehículo	NUM_WHEELS		TYRE_TYPE		WHEEL_DIAM	
	Numero de ruedas por vehículo		Tipo de neumático para cada vehículo. Se debe especificar si es de tipo radial o bias.		Diámetro de la rueda (m)	
	Valor	Fuente	Valor	Fuente	Valor	Fuente
Moto	2	Catálogo del vehículo	2.75 x 17 42P - 100/90 x 17 52P Bias-ply	Catálogo del vehículo	0,4318	Ficha técnica del vehículo
Taxi	4	Ficha técnica del vehículo	165/65R14 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,3556	Ficha técnica del vehículo
Liviano Particular	4	Ficha técnica del vehículo	145/80R14 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,3556	Ficha técnica del vehículo
Utilitario	4	Ficha técnica del vehículo	225/70R16 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,4064	Ficha técnica del vehículo
Bus Liviano	4	Ficha técnica del vehículo	205/75R17,5 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,4445	Ficha técnica del vehículo
Bus Mediano	6	Ficha técnica del vehículo	235/80R17,5 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,4445	Ficha técnica del vehículo
Bus Grande	6	Ficha técnica del vehículo	295/80R22,5 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,5715	Ficha técnica del vehículo
Camión 2 ejes pequeño	4	Ficha técnica del vehículo	7.0 - R15 12 PR Bias-Ply	Ficha técnica del vehículo	0,3810	Ficha técnica del vehículo
Camión 2 ejes Grande	6	Ficha técnica del vehículo	10 R22.5 14 PR Radial	Ficha técnica del vehículo	0,5715	Ficha técnica del vehículo
Camión 3 y 4 ejes pesado	10	Ficha técnica del vehículo	295/80R22,5 Radial	Ficha técnica del vehículo	0,5715	Ficha técnica del vehículo
Camión articulado	18	Ficha técnica del vehículo	11 R24,5 14 PR Radial	Ficha técnica del vehículo	0,6223	Ficha técnica del vehículo

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.9. Volumen de desgaste de neumáticos: S-III. El volumen de desgaste de neumáticos se usa en la modelación del consumo de neumáticos y determina la vida del neumático. Los costos de operación son directamente proporcionales al volumen de desgaste de neumáticos. Para una calibración de nivel 1, se estima a partir del tamaño del neumático usando el siguiente procedimiento (Bennett, 1998).

Figura 3.12 Cálculo de los factores que inciden en el volumen de desgaste de neumáticos en HDM-4



Fuente: Manuales de HDM-4

En relación con la Figura 3.12, la sección transversal de la banda de rodadura se considera como un trapecio con las bases superior e inferior representando las partes

superior e inferior de la banda de rodadura (la parte inferior es la que está en contacto con la carretera).

El área o zona de desgaste del neumático se calcula como:

$$AREA = \frac{LL + LU}{2} (DE - DE_{min}) ARUB$$

Donde:

AREA = área de la sección transversal de la banda de rodadura (mm²)

LL = longitud de la base inferior del trapecio, es decir, en contacto con la carretera (mm)

LU = longitud de la base superior del trapecio (mm)

DE = profundidad de los surcos o ranuras (mm)

DE_{min} = profundidad mínima de los surcos o ranuras (mm)

ARUB = área de caucho frente a los surcos o ranuras (decimal)

El volumen de desgaste del neumático se calcula a partir del área de la banda de rodadura, como sigue:

$$VOL = \frac{PI \text{ DIAM } AREA}{1,000,000}$$

Donde:

VOL = volumen de desgaste del neumático (dm³)

DIAM = diámetro del neumático (mm)

Para calcular el volumen del neumático es necesario predecir el diámetro del neumático, la profundidad de la banda de rodadura, el ancho de la banda de rodadura y el área de goma frente a los surcos.

El ancho de la banda de rodadura en función del ancho de la sección nominal se predice como:

$$LL = a0 \text{ xxx} - a1$$

Donde:

LL = ancho de la banda de rodadura correspondiente a la longitud de la base inferior del trapecio

a0, a1 = coeficientes de ecuaciones (ver Tabla 3.24)

Se encontró que los coeficientes de la anterior ecuación varían según la clase de vehículo, por lo que se desarrollaron ecuaciones separadas para los vehículos livianos y pesados. Estos coeficientes se indican en la Tabla 3.24.

El ancho de la banda de rodadura (LL) corresponde a la longitud de la base inferior del trapecio en la Figura 3.12. Para el ancho superior (UL) Bennett (1998) recomendó un aumento de 10 mm para los vehículos pesados, 6 mm para los vehículos livianos y 4 mm para las motocicletas. En la Tabla 3.24 se indican los valores recomendados en HDM-4 por clase de vehículo.

Tabla 3.24 Parámetros del modelo de desgaste de neumáticos

Clase de vehículo	Parámetros del ancho de la banda		Profundidad de la banda (DE)	Ancho de UL sobre LL	Área de goma (ARUB)
	a0	a1	(mm)	(mm)	(decimal)
Motocicletas	1,05	-52,5	5	4	0,90
Vehículos de pasajeros	1,05	-52,5	8	6	0,85
Utilitarios	1,05	-52,5	8	6	0,85
Camionetas 4WD	1,05	-66,7	9	6	0,85
Camiones livianos	1,05	-66,7	11	10	0,80
Camiones medianos	1,05	-66,7	15	10	0,70
Camiones pesados	1,05	-66,7	17	10	0,70
Camiones articulados	1,05	-66,7	17	10	0,70
Autobuses livianos	1,05	-66,7	11	10	0,80
Autobuses medianos	1,05	-66,7	15	10	0,70
Autobuses pesados	1,05	-66,7	15	10	0,70
Ejes accionados para camiones pesados	1,05	-66,7	26	10	0,70
Ejes no accionados para camiones pesados	1,05	-66,7	15	10	0,70
Camión pesado con remolque	1,05	-66,7	12	10	0,70
Neumáticos súper individuales	0,76	-3,8	16	10	0,70

Fuente: Bennett (1998)

La profundidad de la banda de rodadura se puede obtener a partir de las especificaciones del fabricante, se pueden medir fácilmente a partir de una muestra de neumáticos o se pueden usar los valores de la Tabla 3.24. Esta tabla también contiene los valores de ARUB que corresponde al área de la banda de rodadura dado en decimal. Este último, se puede medir fácilmente registrando los anchos de los surcos o ranuras del neumático y la frecuencia de los mismos en un neumático.

El volumen del neumático se calcula de la siguiente forma:

- Establecer el tamaño del neumático para el vehículo representativo (por ejemplo, 175SR13).
- Calcular el diámetro del neumático a partir de la nomenclatura del neumático.
- Calcular el ancho de la banda de rodadura LL de la nomenclatura del neumático.
- Establecer el valor para UL relativo a LL de la Tabla 3.24 (por ejemplo, para vehículo de pasajeros $UL = LL + 6$).
- Establecer el valor para ARUB de la Tabla 3.24 (por ejemplo, para vehículo de pasajeros $ARUB = 0,85$).
- Establecer la profundidad DE, de la banda de rodadura a partir de una encuesta o de la Tabla 3.24.
- Establecer la profundidad mínima legal de la banda de rodadura DE_{min} o si no hay aplicación de cumplimiento, asumir un valor de 0 mm.
- Sustituir los valores de ARUB, DE, DE_{min} , LL y LU en la ecuación de área o zona de desgaste de la goma para establecer el área de los neumáticos.

- Sustituir el área y el diámetro del neumático en la ecuación de volumen de desgaste de la goma para establecer dicho valor.

Tabla 3.25 Valores predefinidos del consumo de neumáticos en HDM-4

Número de vehículo	Tipo de vehículo	NR0	C0tc	Ctcte	VOL (dm ³)
1	Motocicleta	1,3	0,00639	0,0005	0,35
2	Coche pequeño	1,3	0,02616	0,00204	1,4
3	Coche mediano	1,3	0,02616	0,00204	1,4
4	Coche grande	1,3	0,02616	0,00204	1,4
5	Furgoneta ligera	1,3	0,024	0,00187	1,6
6	Furgoneta de reparto	1,3	0,024	0,00187	1,6
7	Tracción a las cuatro	1,3	0,024	0,00187	1,6
8	Camión ligero	1,3	0,024	0,00187	1,6
9	Camión mediano	1,3	0,02585	0,00201	6
10	Camión pesado	1,3	0,03529	0,00275	8
11	Camión articulado	1,3	0,03988	0,00311	8
12	Mini-bus	1,3	0,024	0,00187	1,6
13	Autobús ligero	1,3	0,02173	0,00169	1,6
14	Autobús mediano	1,3	0,02663	0,00207	6
15	Autobús pesado	1,3	0,03088	0,00241	8
16	Autocar	1,3	0,03088	0,00241	8

Fuente: Bennett (1996)

Para vías de Boyacá se consultó la información de desgaste de los neumáticos por medio de cotizaciones solicitadas a proveedores de neumáticos, encontrando por medio del proveedor Redllantas el dato de entrada para este volumen por cada uno de los vehículos tipo definidos para la flota vehicular del Departamento. Por lo tanto, para el ejercicio a desarrollar, aplicado a vías de Boyacá, se recomienda utilizar los coeficientes sugeridos por el manual de HDM-4, los cuales no alteran el modelo y a su vez, son factores de poca o baja incidencia para los costos de operación arrojados por el modelo. En cuanto al volumen del neumático, se recomienda utilizar datos de proveedores de neumáticos; para el caso del ejercicio a desarrollar en la presente tesis de grado, se utilizarán los valores relacionados en la cotización obtenida.

Tabla 3.26 Valores recomendados de consumo de neumáticos en vías de Boyacá

Variable / descripción	TYRE_C0TC		TYRE_CTCTE		TYRE_CTCON		TYRE_VOL	
	Valor	Fuente	Valor	Fuente	Valor	Fuente	Valor	Fuente
Moto	0,00639	Volumen 4 Manual HDM-4	0,0005	Volumen 4 Manual HDM-4	0,1	Volumen 4 Manual HDM-4	4,2375	Cotización Proveedor Redllantas
Taxi	0,02616		0,00204		0,1		4,2375	
Vehículo Liviano Particular	0,02616		0,00204		0,1		4,2375	
Utilitario	0,024		0,00187		0,1		4,2375	
Bus Liviano	0,02173		0,00169		0,1		4,2375	
Bus Mediano	0,02663		0,00207		0,1		8,6868	

Tabla 3.26 (Continuación)

Variable / descripción	TYRE_C0TC		TYRE_CTCTE		TYRE_CTCON		TYRE_VOL	
	Condición constante del modelo de desgaste de la banda de rodadura del neumático (dm ³)		Coeficiente de desgaste de neumáticos (dm ³ /J-m)		Cambio incremental de consumo de neumáticos relacionado con consumo adicional de combustible.		Volumen de revestimiento de caucho por neumático (dm ³)	
	Valor	Fuente	Valor	Fuente	Valor	Fuente	Valor	Fuente
Bus Grande	0,03088	Volumen 4 Manual HDM-4	0,00241	Volumen 4 Manual HDM-4	0,1	Volumen 4 Manual HDM-4	14,97	Cotización Proveedor Redllantas
Camión 2 ejes pequeño	0,024		0,00187		0,1		4,2375	
Camión 2 ejes Grande	0,02585		0,00201		0,1		8,6868	
Camión 3 y 4 ejes pesado	0,03529		0,00275		0,1		14,976	
Camión articulado	0,03988		0,00311		0,1		14,976	

Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

3.4.1.10. Parámetros de depreciación. HDM-4 contiene dos métodos para la predicción de la depreciación: vida constante y vida óptima.

Con el método de vida constante, la depreciación se calcula como el valor de reposición menos el valor residual dividido por la vida útil del vehículo. Cuando menos del 50% de los viajes realizados son para uso privado, este valor de vida constante se ajusta por la cantidad de horas trabajadas. El ajuste en la calibración de este método se logra utilizando los valores ya calibrados para la utilización anual, de la vida útil y de las horas trabajadas.

Para una calibración de vida óptima, el usuario necesita establecer la vida útil promedio del vehículo con el valor promedio de regularidad. Usando el software HDM Tools, se predice la vida útil en función de la regularidad. Luego se ajusta una ecuación de regresión a estos datos y se usa en HDM-4.

Para establecer los parámetros de depreciación aplicados al presente trabajo de grado y como recomendación para la ejecución del modelo RUE, se sugiere utilizar el método de vida óptima del vehículo, a partir de la cual se determina la vida útil esperada, definida como la distancia recorrida en la que el vehículo se estima que será desechado. La vida óptima del vehículo bajo diferentes condiciones de valores de regularidad, se determina de la siguiente forma:

$$LIFEKM = \frac{LIFEKMO * LIFEKMPCT}{100}$$

donde:

LIFEKM vida óptima de utilización del vehículo, pronosticada en *km*

LIFEKMO promedio de vida útil básica del vehículo, en *km*

LIFEKMPCT kilometraje de vida óptima, como un porcentaje de la vida de servicio básica del vehículo

Los valores predefinidos de HDM-4 para los parámetros de uso del vehículo se muestran en la Tabla 3.27. Estos valores se asumen como datos de entrada en la presente tesis.

Tabla 3.27 Valores predefinidos de HDM-4 para los parámetros de uso del vehículo

Número de vehículo	Tipo de vehículo	AKM0 (km/año)	LIFE0 (años)	HRWK0 (h/años)
1	Motocicleta	10000	10	400
2	Vehículo pequeño	23000	10	550
3	Vehículo mediano	23000	10	550
4	Vehículo grande	23000	10	550
5	Furgoneta ligera	30000	8	1300
6	Furgoneta de reparto	30000	8	1300
7	Tracción a las cuatro ruedas	30000	8	1300
8	Camión ligero	30000	8	1300
9	Camión mediano	40000	12	1200
10	Camión pesado	86000	14	2050
11	Camión articulado	86000	14	2050
12	Mini-bus	30000	8	750
13	Autobús ligero	34000	8	850
14	Autobús mediano	70000	7	1750
15	Autobús grande	70000	12	1750
16	Autocar	70000	12	1750

Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

De acuerdo con la investigación realizada para determinar los valores de vida óptima para vías de Boyacá, se recomiendan utilizar los parámetros indicados en la Tabla 3.28, los cuales son valores recomendados por HDM-4 y su proceso de cálculo se indica en el Anexo 1.

Tabla 3.28 Valores recomendados de parámetros de uso del vehículo en vías de Boyacá

Tipo de vehículo	AKM0 (km/año)	HRWK0 (horas anuales)	LIFE0 (años)	OPTLIFE_A0	OPTLIFE_A1
Moto	15560	615	8	-65,8553	-1,9194
Taxi	87360	3626	10		
Vehículo Liviano Particular	20000	791	10		
Utilitario	20000	791	10		
Bus Liviano	47100	2479	20		
Bus Mediano	47184	2483	20		
Bus Grande	47760	2514	20		
Camión 2 ejes pequeño	46670	2456	35		
Camión 2 ejes Grande	43330	2281	35		
Camión 3 y 4 ejes pesado	20000	1235	35		
Camión articulado	20000	1235	35		

Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

3.4.1.11. Coeficiente de resistencia aerodinámica y área frontal proyectada: S-III.

El coeficiente de resistencia aerodinámica y el área frontal proyectada se deben considerar en conjunto ya que su producto se usa para calcular la resistencia aerodinámica. Los coeficientes de resistencia aerodinámica son difíciles de obtener ya que los valores encontrados en la literatura existente dependen en gran medida de las condiciones en que se probaron. Estos coeficientes están influenciados también por las condiciones de operación; el valor cambia en función del ángulo del viento (Biggs, 1987). Por lo tanto, se recomienda utilizar los valores predeterminados de HDM-4 a menos que haya valores regionales disponibles más apropiados.

El área frontal proyectada se obtiene restando el área debajo del vehículo del producto de su altura máxima por su ancho máximo. Para vehículos livianos, las especificaciones del fabricante se pueden usar para determinar las medidas apropiadas. Para camiones y buses, se recomienda reunir los datos de una pequeña encuesta de campo debido a la gran variedad de configuraciones de carrocerías y prácticas de carga.

En HDM-4 hay un valor adicional denominado Multiplicador CD (CDmult), el cual se usa para reflejar el efecto del viento sobre el coeficiente de resistencia aerodinámica (CD). Su cálculo se hace usando el software HDM Tools. El Multiplicador CD no necesita ser recalculado a menos que haya un cambio significativo en el valor de CD.

Debido a las restricciones para conseguir la documentación necesaria y a la poca información que se tiene de estos parámetros en el medio local, para la presente tesis de grado se utilizan los valores por defecto recomendados en los manuales de HDM-4.

Tabla 3.29 Valores recomendados de parámetros de resistencia aerodinámica para vías de Boyacá

Variable / descripción	AF	CD	CDMULT
	Área frontal del vehículo (m ²)	Coeficiente de arrastre aerodinámico	Multiplicador del coeficiente de arrastre aerodinámico
	Valor de entrada	Valor de entrada	Valor de entrada
Moto	0,8	0,70	1,10
Taxi	1,8	0,40	1,10
Vehículo Liviano Particular	1,9	0,42	1,10
Utilitario	2,8	0,50	1,11
Bus Liviano	4,0	0,50	1,13
Bus Mediano	5,0	0,55	1,14
Bus Grande	6,5	0,65	1,14
Camión 2 ejes pequeño	4,0	0,55	1,13
Camión 2 ejes Grande	5,0	0,60	1,13
Camión 3 y 4 ejes pesado	8,5	0,70	1,14
Camión articulado	9,0	0,80	1,22

Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

3.4.1.12. Potencia de frenado: S-IV. HDM-4 diferencia entre velocidades en pendientes cortas y largas. En las pendientes cortas, la inclinación no tiene efecto sobre la velocidad. Cuando la pendiente excede una longitud crítica, la velocidad se rige por la potencia de frenado, lo que reducirá la velocidad del vehículo para mantener el control. En HDM-4 se asume como valor residual el 1% del precio del vehículo nuevo.

En una calibración de nivel 1 se puede suponer que los valores predeterminados de HDM-4 son adecuados, pero si el análisis incluye pendientes pronunciadas, puede ser conveniente calcular nuevos valores. Esto se puede hacer usando las siguientes ecuaciones:

$$HPBRAKE = 9.3 \text{ GVW} + 13 \quad \text{HDM-4}$$

Donde:

HPBRAKE = Potencia de frenado en Kw

La ecuación de HDM-4 proviene de un análisis de los valores de parámetros por defecto de NDLI (1995a).

Teniendo en cuenta que para el presente trabajo de grado se trabaja las calibraciones para niveles 1 y 2, en este caso, para vías de Boyacá se asumirán los valores predeterminados por HDM-4.

Tabla 3.30 Valores recomendados de potencia de frenado para vías de Boyacá

Variable / descripción Tipo de vehículo	PBRAKE	CGR_A0	CGR_A1	CGR_A2
	Potencia o capacidad de frenado del vehículo	Coefficiente de regresión para la pendiente del tramo de la vía.	Coefficiente de regresión para la pendiente del tramo de la vía.	Coefficiente de regresión para la pendiente del tramo de la vía.
	Valor de entrada	Valor de entrada	Valor de entrada	Valor de entrada
Moto	5	94,9	0,85	2,8
Taxi	20	94,9	0,85	2,8
Vehículo Liviano Particular	20	94,9	0,85	2,8
Utilitario	25	94,9	0,85	2,8
Bus Liviano	45	94,9	0,85	2,8
Bus Mediano	70	94,9	0,85	2,8
Bus Grande	120	94,9	0,85	2,8
Camión 2 ejes pequeño	45	94,9	0,85	2,8
Camión 2 ejes Grande	70	94,9	0,85	2,8
Camión 3 y 4 ejes pesado	255	94,9	0,85	2,8
Camión articulado	255	94,9	0,85	2,8

Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

3.4.1.13. Velocidad del motor. La velocidad del motor se usa en HDM-4 para predecir el combustible requerido para mantener el funcionamiento del motor. La velocidad del motor depende de la velocidad de la carretera, del engranaje seleccionado y de la relación diferencial.

Para calibrar la velocidad del motor se desarrolló un modelo de simulación, el cual se debe utilizar para una calibración de nivel 1.

Utilizando las especificaciones del fabricante, se debe establecer un conjunto de engranajes y relaciones diferenciales para una selección de vehículos representativos. Estos se usan como datos de entrada para el modelo de simulación que aplica un conjunto de reglas para el comportamiento del conductor y que se usan para estimar la velocidad del motor en una escala de velocidades en la carretera. Los datos de salida del modelo son un conjunto de velocidades del motor frente a la carretera para cada conjunto de características suministradas del vehículo. Estos datos deben analizarse usando técnicas de regresión para desarrollar el conjunto de parámetros necesarios del modelo para HDM-4.

Teniendo en cuenta los manuales de HDM-4, se determinaron los valores recomendados para vías de Boyacá, de acuerdo con la Tabla 3.31

Tabla 3.31 Valores recomendados para velocidad del motor en vías de Boyacá

Tipo de vehículo	Parámetros de la velocidad del motor				Velocidad del motor en vacío
	RPM_A0	RPM_A1	RPM_A2	RPM_A3	RPM_IDLE
	RPM	RPM/(m/s)	RPM/(m/s) ²	m/s	RPM
Moto	2790	94	2,83	31	800
Taxi	2280	17	0,83	42	800
Vehículo Liviano Particular	2280	17	0,83	42	800
Utilitario	2490	-30,4	2,25	34	800
Bus Liviano	1214	17,6	2,32	22	500
Bus Mediano	1214	17,6	2,32	22	500
Bus Grande	1167	-24	1,76	22	500
Camión 2 ejes pequeño	1214	17,6	2,32	22	500
Camión 2 ejes Grande	1214	17,6	2,32	22	500
Camión 3 y 4 ejes pesado	1167	-24	1,76	22	500
Camión articulado	1167	-24	1,76	22	500

Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

3.4.2. Calibración de variables de nivel 2 para vías de Boyacá – Relaciones primarias. A continuación, se describen las variables recomendadas para vías de Boyacá que corresponden al nivel 2 y que son utilizadas como relaciones primarias para la calibración del modelo.

3.4.2.1. Predicción de la velocidad.

- Medida de la velocidad deseada (VDESIR)

Una calibración de nivel 2 requiere la medición de VDESIR. Idealmente, esto se debe hacer en una serie de secciones de carretera que son rectas, a nivel o con una pendiente mínima y no congestionada. La velocidad libre debe medirse utilizando métodos manuales o automáticos.

Es importante que se observe un número suficiente de vehículos para reducir al máximo los errores estadísticos. Para el mismo nivel de precisión, el tamaño de la muestra es proporcional a la desviación estándar de las velocidades. Por lo tanto, los países desarrollados con un tráfico homogéneo, requieren tamaños de muestras más pequeños que los países en vías de desarrollo con un tráfico heterogéneo. Con mediciones indirectas, el tamaño de la muestra debe ser suficiente para garantizar que

haya una confianza del 90% de que la estimación sea +2,5 km/h. Con velocidades, se puede suponer que el coeficiente de variación es de aproximadamente 0,12 para estimar el tamaño de la muestra. La documentación de HDM-4 en su Apéndice I presenta una técnica para estimar el tamaño de la muestra.

Una vez establecida la velocidad media de operación, se utiliza en conjunto el software HDM-4 para determinar el valor apropiado de VDESIR. El software HDM-4 se ejecuta iterativamente usando los mismos parámetros de la sección de la carretera que prevaleció en la encuesta de velocidad, variando VDESIR hasta que la velocidad pronosticada y observada coincidan.

La velocidad deseada es una función de la curvatura. Si se utiliza HDM-4 en diferentes niveles de curvatura, es necesario establecer valores separados de VDESIR para aplicarlos a los diferentes niveles.

Una vez revisada la documentación de HDM-4 en su volumen 4 numeral 3.2.5 Velocidad deseada (VDESIR), se establecieron los valores recomendados para vías de Boyacá, de acuerdo con la metodología y las relaciones allí descritas. De esta manera, en la Tabla 3.32 se presentan los valores adoptados para este proyecto.

Tabla 3.32 Parámetros definidos de velocidad deseada para vías de Boyacá

Tipo de vehículo	B_VDES2	B_VDES_A0	B_VDES_A1	B_VDES_A2	B_VDES_CW1	B_VDES_CW2
Moto	144	0,002	2,9	0,75	4	6,8
Taxi	144,36	0,002	2,9	0,75	4	6,8
Vehículo Liviano Particular	125,28	0,002	2,9	0,75	4	6,8
Utilitario	141,12	0,002	2,9	0,75	4	6,8
Bus Liviano	123,84	0,0028	0,6	0,75	4	6,8
Bus Mediano	134,64	0,0028	0,6	0,75	4	6,8
Bus Grande	89,28	0,0033	0,6	0,75	4	6,8
Camión 2 ejes pequeño	128,16	0,0028	0,7	0,75	4	6,8
Camión 2 ejes Grande	105,48	0,0028	0,7	0,75	4	6,8
Camión 3 y 4 ejes pesado	88,56	0,0033	0,7	0,75	4	6,8
Camión articulado	104,76	0,0039	0,7	0,75	4	6,8

B_VDES2: Velocidad deseada en una vía de dos carriles en pavimento flexible (km/h).

B_VDES_A0: Efectos de las curvas horizontales sobre la velocidad deseada para vías en pavimento flexible.

B_VDES_A1: Tasa de incremento de la velocidad deseada en una vía de dos o más carriles (pavimento flexible). Se mide en ms/m por m de ancho de carretera.

B_VDES_A2: Relación entre la velocidad deseada en una vía de un carril sencillo y la velocidad deseada en una vía de 2 carriles en pavimento flexible.

B_VDES_CW1: Ancho mínimo de la calzada en una vía de un solo carril en pavimento flexible (m)

B_VDES_CW2: Ancho mínimo para una vía de dos carriles en pavimento flexible (m)

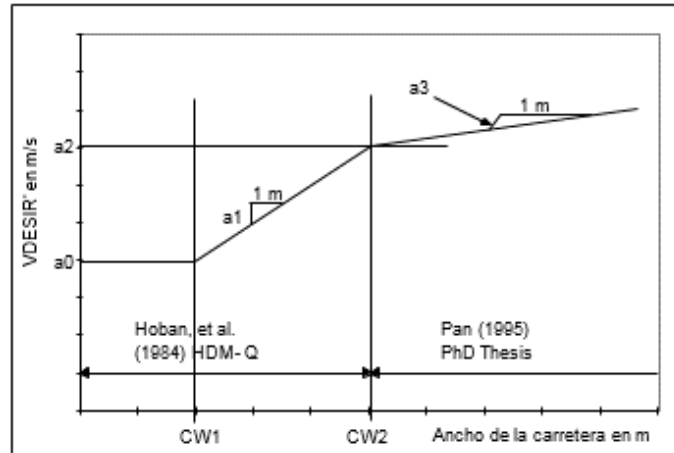
Fuente: Elaboración propia con base en Manuales HDM-4

- Ancho de calzada

El modelo de amplitud de velocidad deseada de HDM-4 se ilustra en la Figura 3.13. La suposición básica es que existe un ancho crítico de calzada por debajo del cual las velocidades no se verán afectadas por él mismo (CW1). Entre esta velocidad mínima (VDESMIN) y la velocidad deseada en las carreteras de dos carriles, hay un aumento lineal en la velocidad. En carreteras con más de dos carriles, hay un aumento continuo en la velocidad, pero a una tasa mucho más baja.

La velocidad mínima deseada en HDM-4 es del 75% de la velocidad deseada en una carretera de dos carriles. Una fórmula similar se utiliza para obtener la pendiente de aumento de la velocidad cuando las carreteras tienen más de dos carriles.

Figura 3.13 Modelo de amplitud para la velocidad deseada de HDM-4



Fuente: Manuales de HDM-4

Los valores de ancho de calzada mínimos de acuerdo con el modelo de amplitud para la velocidad deseada de HDM-4 se presentan en la Tabla 3.32. Estos valores, se utilizarán únicamente como valores de entrada, requeridos por el software HDM-4 para correr el modelo y realizar el respectivo análisis. No obstante, para el análisis con parámetros reales aplicados para vías de Boyacá, y con el fin de determinar los valores de entrada recomendados, se utilizará la información correspondiente a tres carreteras de acuerdo con los valores consignados en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33 Datos de entrada de vías de Boyacá para integrar en el sistema HDM-4

Estación Maestra	TRAMO	Ancho de calzada (m)	Ancho de carril (m)	Ancho de berma (m)
Tuta	El Mortiñal - Paipa	7,6	3,2	0,6
Albarracín	Villapinzón - Ventaquemada	7,3	2,75	0,9
El Roble	Gachancipá - Sesquilé	7,65	3,225	0,6

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior, teniendo en cuenta la información suministrada por la subdirección de valorización y peaje del INVIAS, de la cual se cuenta con los datos de tránsito vehicular de las estaciones maestras de Tuta, El Roble y Albarracín y las características geométricas de los tres tramos de vía indicados en la Tabla 3.33, pertenecientes a los departamentos de Boyacá y Cundinamarca.

- Regularidad

El modelo de velocidad-regularidad se calibra a través de la velocidad máxima corregida.

Los datos para calibrar la velocidad máxima corregida se obtienen de un estudio antes y después en un pavimento seleccionado para mantenimiento, en el cual, se reducirá la regularidad. Si no hay cambios en el ancho o la alineación, cualquier aumento en la velocidad después del mantenimiento es atribuible a la reducción de la regularidad.

La Tabla 3.34 muestra el cambio en las velocidades antes y después de las superposiciones del estudio realizado en la India (NDLI, 1997). En todos los casos hubo un aumento en la velocidad que acompaña la disminución de la regularidad.

La calibración del modelo se realiza ejecutando HDM-4 en cada una de las irregularidades del estudio de antes y después y registrando las velocidades pronosticadas. Los demás parámetros del modelo de velocidad deben reflejar las condiciones locales donde se adelantó la encuesta de velocidad.

La pendiente de la velocidad-regularidad (km/h/IRI) debe calcularse y compararse con la de los estudios. Puesto que el modelo de velocidad-regularidad no es lineal, el proceso debe repetirse al menos dos veces para garantizar que se obtengan resultados consistentes.

Tabla 3.34 Estudio de los datos de la velocidad-regularidad

Vehículo	Lugar	Dir.	Velocidad en km/h			Regularidad en IRI m/km			Escala de velocidad/regularidad (km/h/IRI)	
			Antes	Desp	Cambio	Antes	Desp	Cambio	Por lugar	Media
PC	1	1	61,1	65,4	4,3	5,7	4,0	1,7	2,5	
	1	2	61,0	66,5	5,5	7,9	4,3	3,6	1,5	
	2	1	66,0	72,5	6,5	7,4	3,7	3,7	1,8	
	2	2	59,7	70,0	10,3	6,7	3,7	3,0	3,4	2,3
MCV	1	1	48,3	52,3	4,0	5,7	4,0	1,7	2,4	
	1	2	51,4	54,8	3,4	7,9	4,3	3,6	0,9	
	2	1	50,6	55,8	5,2	7,4	3,7	3,7	1,4	
	2	2	53,1	54,8	1,7	6,7	3,7	3,0	0,6	1,3
BUS	1	1	57,0	57,3	0,3	5,7	4,0	1,7	0,2	
	1	2	55,0	56,7	1,7	7,9	4,3	3,6	0,5	
	2	1	57,2	60,6	3,4	7,4	3,7	3,7	0,9	
	2	2	56,7	57,1	0,4	6,7	3,7	3,0	0,1	0,4
MC	1	1	44,3	49,0	4,7	5,7	4,0	1,7	2,8	
	1	2	44,1	49,0	4,9	7,9	4,3	3,6	1,4	
	2	1	44,0	50,1	6,1	7,4	3,7	3,7	1,6	
	2	2	43,1	48,9	5,8	6,7	3,7	3,0	1,9	1,9

Fuente: NDLI (1997)

Debido a que no se cuenta con la información de la regularidad superficial para los tramos de vía seleccionados, para la presente tesis de grado se aplicarán los criterios adoptados por el INVIAS para definir el IRI según el tránsito. La norma colombiana de INVIAS por medio de la norma de ensayo INV E – 790 – 13 (INVIAS, 2013), establece la metodología y determinación del Índice Internacional De Rugosidad (IRI) para medir la rugosidad de los pavimentos. Utilizando la metodología sugerida por el INVIAS, se determinaron los siguientes valores de IRI para ser aplicado en las vías de Boyacá.

Tabla 3.35 Determinación de los valores de IRI para las vías de Boyacá

Clase de carretera	Bituminosa					Sin pavimentar					Hormigón				
	MB	B	R	M	MM	MB	B	R	M	MM	MB	B	R	M	MM
Primaria-Bajo	2,0	3,5	4,7	6,1	8,5	3,0	5,0	8,0	15,0	20,0	2,0	3,5	4,7	6,1	8,5
Primaria-Medio bajo	1,9	3,0	4,2	5,6	7,5	3,0	5,0	8,0	15,0	20,0	2,0	3,5	4,7	6,1	8,3
Primaria-Medio alto	1,8	2,5	3,8	5,2	7,5	3,0	5,0	8,0	15,0	20,0	2,0	3,5	4,7	6,1	8,3
Primaria-Alto	1,7	2,0	3,5	5,0	7,3	2,5	4,0	7,0	10,0	15,0	1,9	3,0	4,2	5,6	7,5
Primaria-Súper alto	1,6	2,0	3,5	4,7	6,9	2,0	3,5	6,0	9,0	10,0	1,8	2,5	3,8	5,2	7,5
Primaria-Especial	1,6	2,0	3,5	4,7	6,9	2,0	3,5	6,0	9,0	10,0	1,8	2,5	3,8	5,2	7,5

Fuente: Elaboración propia con base en INVIAS, 2013

De acuerdo con la Tabla 3.35 se definieron dichos valores teniendo en cuenta que el INVIAS maneja indiferentemente valores de IRI para toda su red sin importar el tipo de superficie, además de configurar valores de IRI para los valores de tránsito definidos. Así mismo, HDM-4 propone valores idénticos para superficie bituminosa o en hormigón. En consecuencia, se proponen los mismos valores de IRI de superficie bituminosa para superficie en hormigón adaptándolos según el tránsito definido para pavimentos rígidos. En cuanto a pavimentos en afirmado, se definieron valores de IRI según la densidad vehicular o concentración de vehículos en los rangos de tránsito.

De esta manera y teniendo como referencia los datos sugeridos en el volumen 4 del manual de HDM-4, en el cual se adopta un valor predefinido de 3,0 para la regularidad, para las vías de Boyacá se establecerá un valor mínimo de 3,5 m/km según el análisis de datos obtenido para pavimentos flexibles, sin embargo, para efectos del análisis de sensibilidad para la calibración de variables aplicado para los tramos de estudio se tomarán valores entre 2,0 m/km a 20,0 m/km que corresponden a las características señaladas por HDM-4. Así mismo, para algunos corredores a incluir dentro del análisis de sensibilidad, se tendrá en cuenta el valor del IRI real medido de acuerdo con los resultados de estudios realizados previamente a cada corredor.

Para la selección del valor de la regularidad mínima, se recomienda adoptar los valores promedio de cada rango de datos obtenido, previamente estableciendo el tipo de rodadura, el nivel de intervención de la vía y el rango de tránsito de la vía de estudio. En este caso, el valor mínimo adoptado se encuentra por encima del valor predeterminado por el HDM-4 debido a la calidad y las condiciones de las vías a las cuales se ajustó el modelo en el sistema HDM-4. Sin embargo, este valor no altera significativamente los resultados del modelo, sumado a que, especialmente para el modelo de consumo de repuestos, la regularidad por debajo de cierto nivel, no influye significativamente dentro del mismo.

- Velocidad en la curva

Para calibrar el modelo de velocidad en la curva, es necesario realizar una serie de mediciones en las carreteras con diferentes radios de curvatura. Los datos de las velocidades en los puntos medios de las curvas se recopilan en un rango de radios de curvatura y se analizan para desarrollar un modelo no lineal que relaciona la velocidad de la curva con el radio de curvatura.

Los datos se ajustan al siguiente modelo:

$$VCURVE = a0 \times R^{a1}$$

Donde:

VCURVE = Velocidad límite debida a la curvatura (m/s)

R = Radio de curvatura (m)

a0, a1 = Parámetros del modelo

Para la presente tesis este parámetro se determinó por medio del análisis de sensibilidad para el modelo de velocidad, el cual se incluye en el Anexo 6.

- Factor de cumplimiento del límite de velocidad

Este factor es la velocidad a la que el tránsito viaja por encima del límite de velocidad aprobado bajo condiciones ideales. Se puede estimar realizando una encuesta de velocidad y comparando las velocidades promedio obtenidas con las velocidades promedio aprobadas. El valor predeterminado es 1,1 que indica que el tránsito viajará hasta un 10% por encima del límite de velocidad aprobado.

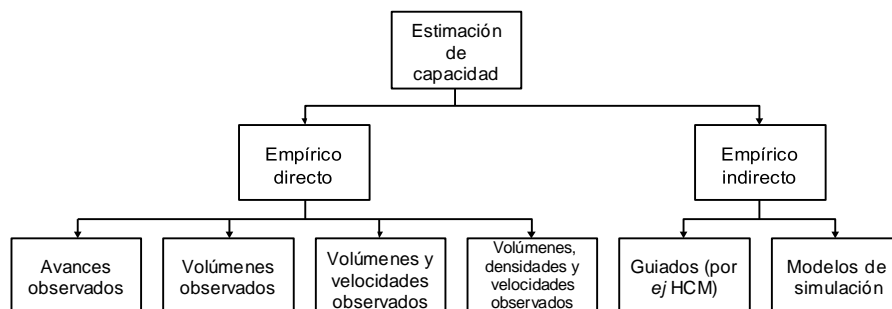
3.4.2.2. Capacidad y relación velocidad-capacidad.

- Capacidad

Como se describió en la Figura 3.8, el software HDM-4 requiere las capacidades nominales y máximas. Para establecer estas capacidades en una calibración de nivel 2, se realizan pruebas de campo.

Como se muestra en la Figura 3.14, existen diferentes métodos para estimar la capacidad. Si se intenta determinar la capacidad de una carretera con métodos existentes, generalmente se obtendrá una estimación del valor de la capacidad, pero la validez de este valor es difícil de investigar debido a la ausencia de un valor de referencia de la capacidad. A la fecha, no se ha establecido un método claro y confiable.

Figura 3.14 Métodos de estimación de la capacidad



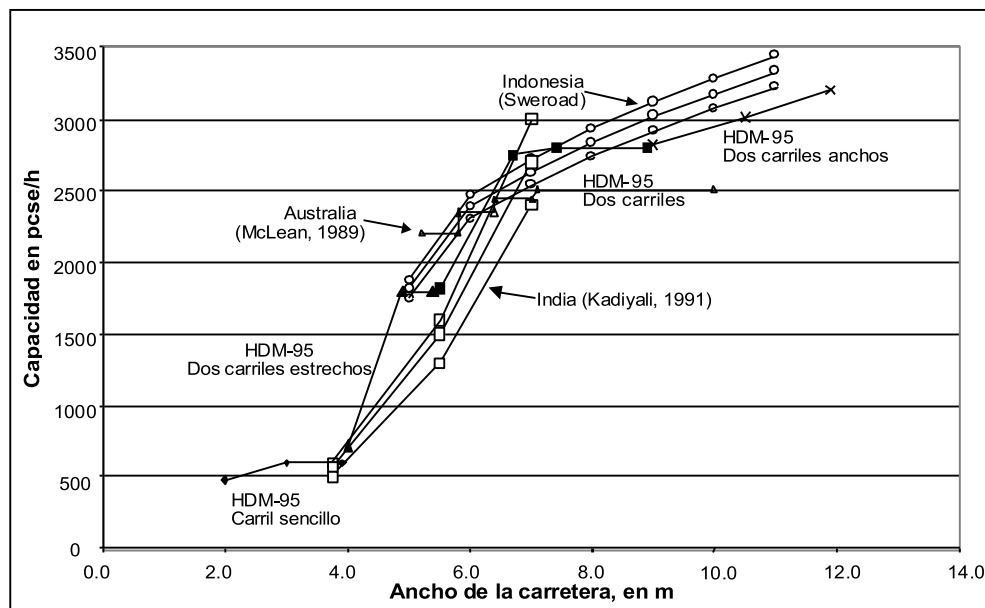
Fuente: Manuales de HDM-4

Independientemente del método que se use, es necesario muestrear suficientes intervalos de tiempo para obtener una estimación confiable. Normalmente, se miden flujos en períodos de 15 minutos y se convierten posteriormente en flujo por hora. En la mayoría de los casos, la capacidad es una condición difícil de calcular con confiabilidad, por lo que se suelen extrapolar los datos recopilados a flujos más bajos para estimar la capacidad.

En el numeral 3.4.1.3 se dio una serie de factores de reducción de la capacidad por defecto, por lo tanto, los análisis y la determinación de la capacidad estimada deben considerar estos factores para establecer los valores locales.

Dentro de la estimación de la capacidad, el ancho de la carretera es un factor particularmente importante, de manera tal que la fórmula de HDM-4 resulta en función de la capacidad frente al ancho. Sin embargo, como se muestra en la Figura 3.15, algunos estudios han considerado la capacidad como una función continua del ancho. Esto tiene la ventaja de evitar inconsistencias que puedan surgir en los límites de las funciones y de allí, la importancia de realizar la calibración local. En la misma figura, se muestran las diferentes capacidades encontradas para estos estudios.

Figura 3.15 Efecto del ancho en la capacidad



Fuente: Sweroad (1997) y Kadiyali (1991)

Es importante centrarse en los anchos de calzada de las carreteras ya que muchas aplicaciones consideran un rango de calzada entre 6 y 8 metros. Si las carreteras tienen ancho de calzada mayor de 6 metros, probablemente se tendrá un aumento sustancial en la capacidad, similar a las funciones de HDM-4. Por el contrario, anchos de calzada por debajo de 6 metros tienen poco impacto en la capacidad. Por lo tanto, es necesario establecer estimaciones reales de la capacidad, de manera que reflejen los impactos operacionales esperados.

Dada la limitada información que se dispone para la mayoría de las calibraciones de nivel 2, hay dos técnicas a considerar para estimar la capacidad: avances y flujos observados. Estas dos técnicas se describen a continuación:

➤ **Avances**

Los avances son la diferencia de tiempo, en segundos, entre vehículos sucesivos (generalmente medidos desde el parachoques trasero hasta el parachoques delantero o usando detectores entre los ejes delanteros). La capacidad de la carretera se define como:

$$Q_{ult} = \frac{3600}{hc}$$

Donde:

hc = avance medio entre los vehículos (s)

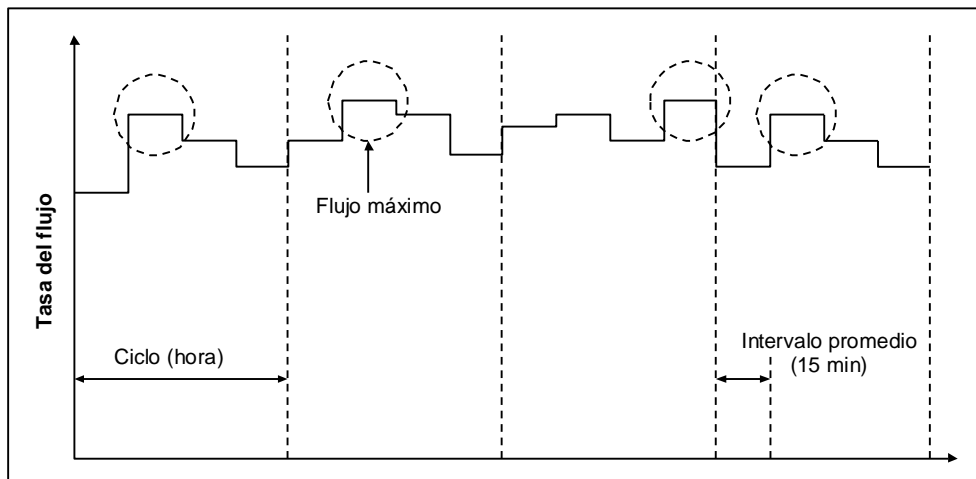
El método se basa en la teoría de que a altos flujos todavía hay dos poblaciones de vehículos:

- a. Restringidos (seguidores)
- b. Sin restricciones (líderes)

➤ Flujos observados

Con los flujos observados, los datos se recopilan en carreteras que alcanzarán su capacidad en algún momento durante el período de estudio. La capacidad de una carretera se toma como el flujo máximo, o el promedio de varios flujos muy altos, observados durante el período de análisis como se ilustra en la Figura 3.16.

Figura 3.16 Estimado de la capacidad de los flujos observados



Fuente: Manuales de HDM-4

La desventaja de este método es que las carreteras no siempre alcanzan la capacidad. Una forma de garantizar altos flujos, es planificar la recopilación de datos en torno a eventos especiales, como días festivos cuando se espera que los flujos de tráfico sean altos.

- Velocidad a la capacidad nominal

La velocidad a la capacidad nominal se estima ajustando una función de regresión a datos de flujo de velocidad para flujos mayores al del punto de interrupción (Q_0). Las capacidades nominales son sustituidas en estas ecuaciones para establecer las velocidades correspondientes. De acuerdo con resultados de estudios anteriores, se identificó que asumir en la fórmula de HDM-4 el 85 por ciento de la velocidad libre era demasiado alto y, por lo tanto, fue posible determinar que se debe asumir un valor entre el 77 al 82 por ciento.

- Capacidad máxima

Como se explica en HTC (1999): “La velocidad a la máxima capacidad es notoriamente difícil de estimar. Esto se debe a que los flujos se vuelven inestables en una región cuando la demanda excede la capacidad que genera una falla en el flujo que conduce a velocidades marcadamente inferiores”.

- Periodo de bajo flujo vehicular

Hay dos técnicas que se pueden utilizar para investigar el período de bajo flujo vehicular:

- Fórmula de regresión

Se pueden realizar regresiones lineales para varios rangos de flujos: <100; <200, <300, <400, <500, etc.

Si no hay interacciones en el tránsito, la ecuación resultante no sería estadísticamente válida. Hay una variedad de métodos para evaluar la validez de una ecuación de regresión y lo más fácil es asegurar que las estadísticas “t” de los coeficientes de regresión sean significativos con un nivel de confianza del 95%. El límite superior del último rango, antes de una ecuación estadísticamente válida, se toma como el punto de corte donde termina el periodo de bajo flujo.

- Fórmula de velocidad máxima

Para cada lugar se establecen velocidades promedio a diferentes flujos. El flujo en el que se observa la velocidad máxima se toma como el punto de corte. Para tener en cuenta la variabilidad en los datos, es común promediar los flujos por carril.

Dentro del Anexo 6, como parte del Anexo 6.2 se encuentran la propuesta y el ajuste de los modelos de capacidad – velocidad utilizados para los corredores de análisis. Dentro del archivo se encuentran los datos generales de volúmenes para cada corredor y lo que corresponde con los cálculos y análisis de la capacidad máxima, capacidad a flujo libre, capacidad – velocidad y los modelos de capacidad – velocidad para el corredor y para los distintos vehículos.

3.4.2.3. Equivalente de espacio para los vehículos de pasajeros: S-II/S-III. Las congestiones del tránsito están compuestas por una variedad de vehículos, desde vehículos de pasajeros hasta camiones pesados. Para los efectos de la capacidad, es necesario convertirlos en un flujo de tránsito homogéneo. Esto se hace en HDM-4 mediante el uso de equivalentes de espacio que ocupa el pasajero en un vehículo (PCSE). El PCSE se diferencia de la unidad de equivalencia de ocupación de un pasajero tradicional (PCU/PCE) en que este se basa en el área ocupada por el vehículo. El PCU se basa en el área ocupada y en el rendimiento del vehículo. Dado que HDM-4 explícitamente modela el rendimiento, el uso de PCU/PCE daría lugar a doble conteo. Por esta razón, los valores de PCSE son siempre menores que los valores de PCU.

Hoban et al. (1994) definieron los valores recomendados para PCSE en HDM-4. Estos valores básicos solamente representan el espacio longitudinal ocupado por los vehículos y varían según el ancho de carril como se muestra en la Tabla 3.36. En esta tabla se consideran los siguientes aspectos:

- El tiempo de avance calculado a partir del avance espacial usando una velocidad de 72 km/h.
- La longitud promedio de camiones más el remolque aumentó de 11 a 15 metros, basado en la diferencia entre el espacio total y el avance espacial.

Los valores PCSE de la Tabla 3.36 se calcularon estableciendo el espacio total ocupado por los vehículos de pasajeros. Los valores básicos del PCSE para las demás clases de vehículos se determinaron a partir de la relación de su espacio total con el espacio ocupado por el vehículo de pasajeros. Este valor se ajustó subjetivamente en HDM-4 considerando el efecto del ancho de calzada para obtener los valores recomendados en las últimas tres columnas.

Tabla 3.36 Valores PCSE por clase de vehículo según HDM-4

Clases de vehículo	Prom. long. (m)	Tiempo avance (s)	Espacio avance (m)	Espacio total (m)	PCSE básico	Valores recomendados		
						2-carril 4-carril	2-carril estrecho	1-carril
Vehículos	4	1,6	32	36	1	1	1	1
Camionetas	4,5	1,8	36	40,5	1,1	1	1	1
Autobús	14	2,2	44	58	1,6	1,8	2	2,2
Camión liviano	5	2	40	45	1,3	1,3	1,4	1,5
Camión mediano	7	2,2	44	51	1,4	1,5	1,6	1,8
Camión pesado	9	2,4	48	57	1,6	1,8	2	2,4
Camión+remolque	15	2,5	50	65	1,8	2,2	2,6	3

Fuente: Manuales de HDM-4

La calibración local de los valores de PCSE se puede hacer ajustando las suposiciones básicas de la Tabla 3.36. La información más fácil de obtener es la longitud del vehículo, para lo cual, los estudios de campo se pueden enfocar en establecer los avances promedio para los vehículos, dando así el espacio total. Para calcular con exactitud estos valores, se recomienda utilizar detectores de ejes, lo cuales son útiles en este tipo de trabajo ya que el tiempo entre los primeros ejes de vehículos sucesivos dividido por la velocidad (en m/s) da el espacio total ocupado.

De acuerdo con un estudio de consultoría, relacionado con la macromodelación calibrada de la malla vial arterial para las condiciones actuales del tránsito de Bogotá, adelantado por la Alcaldía Mayor de Bogotá a través de Cal & Mayor y Asociados, se determinó la ocupación promedio de pasajeros por tipo de vehículo, cuyo valor es representativo para las condiciones de vías de Boyacá teniendo en cuenta que la flota vehicular presenta cierto grado de similitud en cuanto a sus características, por lo tanto, el espacio ocupado por un pasajero es usualmente el mismo. En la Tabla 3.37 se presentan los valores recomendados para las vías de Boyacá.

Tabla 3.37 Valores PCSE recomendado para vías de Boyacá

Variable / descripción	PCSE	
	Factor de equivalencia del espacio que ocupa el pasajero por vehículo.	
Tipo de vehículo	Valor de entrada	Fuente
Moto	0,50	Estudio de macromodelación Bogotá
Taxi	1,00	
Vehículo Liviano Particular	1,00	
Utilitario	1,00	
Bus Liviano	1,20	
Bus Mediano	1,50	
Bus Grande	1,60	
Camión 2 ejes pequeño	1,10	
Camión 2 ejes Grande	1,30	
Camión 3 y 4 ejes pesado	1,40	
Camión articulado	1,60	

Fuente: Manuales de HDM-4

3.4.2.4. Consumo de combustible. Los modelos de consumo de combustible de HDM-III y HDM-4 están basados en principios mecanicistas. HDM-III desarrolló este modelo utilizando una fórmula basada en la regresión, mientras que en HDM-4 es más una formulación puramente mecanicista que refleja de manera más efectiva los diferentes componentes que afectan el consumo de combustible. Para calibrar los parámetros del modelo de consumo de combustible, es necesario tener una serie de medidas de consumo de combustible sin procesar o, alternativamente, disponer de modelos de consumo de combustible existentes, como los desarrollados usando técnicas de regresión lineal múltiple.

- Modelo de consumo de combustible de HDM-4

Este modelo de consumo de combustible HDM-4 predice el consumo de combustible en función de la potencia de la siguiente manera:

$$IFC = \text{MAX} (\alpha, \xi P_{\text{tot}})$$

Que se puede expresar como:

$$IFC = \text{MAX} (\alpha, \xi P_{\text{tr}} + \xi P_{\text{engaccs}})$$

Donde:

- IFC = Consumo instantáneo de combustible (ml/s)
- α = Consumo de combustible inactivo (ml/s)
- ξ = Factor de eficiencia de combustible a potencia (ml/kW.s)
- P_{tot} = Potencia total requerida (kW)
- P_{tr} = Potencia a tracción total requerida (kW)
- P_{engaccs} = Potencia total del motor y accesorios (kW)

La calibración del modelo de combustible se enfoca en los parámetros α y ξ . Las ecuaciones usadas para predecir la fuerza total son las siguientes:

$$F_{\text{tr}} = F_{\text{a}} + F_{\text{g}} + F_{\text{r}}$$

$$F_{\text{a}} = R_1 v^2$$

$$F_g = R_2 GR$$

$$F_r = R_3 + R_4 v^2$$

Las variables R1 a R4 son simplificaciones de las variables en las ecuaciones reales de HDM-4:

$$R_1 = 0.5 RHO \ CD \ CDMULT \ AF$$

$$R_2 = M \ g$$

$$R_3 = FCLIM \ CR_2 (b_{11} N_w + CR_1 b_{12} M)$$

$$R_4 = FCLIM \ CR_2 \ CR_1 \ b_{13}$$

Las potencias totales son:

$$F_{tr} = R_3 + (R_1 + R_4) v^2 + R_2 GR$$

$$P_{tr} = F_{tr} \frac{v}{1000}$$

$$P_{tr} = \frac{[(R_3 + R_2 GR)v + (R_1 + R_4)v^3]}{1000}$$

Donde:

v	= Velocidad del vehículo (m/s)
RHO	= Densidad de la masa del aire (kg/m ³)
CD	= Coeficiente de resistencia aerodinámica
CMULT	= Multiplicador del coeficiente de resistencia aerodinámica
AF	= Área frontal proyectada
CR1 y CR2	= Parámetros del modelo de resistencia a la rodadura
b11 a b13	= Parámetros del modelo de resistencia a la rodadura
GR	= Pendiente (%)
FLCIM	= Factor de ajuste climático

- Calibración usando datos de consumo de combustible sin procesar

Con datos de consumo de combustible sin procesar es la mejor forma de calibrar el modelo, aunque los datos rara vez están disponibles. Sin embargo, se han realizado numerosos estudios sobre el consumo de combustible que se encuentran fácilmente en la literatura. Yuli (1996) ofrece una buena descripción de la calibración del modelo de combustible en HDM-III y la conversión de los resultados al modelo de combustible de HDM-4. Hay dos parámetros para ser calibrados: eficiencia básica del motor (ξ_b) y cambio en la eficiencia del motor a mayor potencia.

El procedimiento de calibración es el siguiente:

1. Realizar observaciones con el motor apagado. De esto se obtiene la tasa de combustible inactivo.
2. Realizar una serie de mediciones en carretera para viajes a diferentes velocidades. De esto se obtiene un conjunto de datos comunes a la velocidad y al combustible. Asegurar que el combustible se exprese en términos de ml/s. Si, por ejemplo, se midió en ml/km se convierte a ml/s multiplicándolo por el factor v/1000.

3. Es necesario calcular la potencia requerida por el vehículo a cada velocidad. Usando la formulación del modelo mecanicista de HDM-4, calcular los requisitos de potencia a tracción total (P_{tr}) para las velocidades en las que hay mediciones disponibles de combustible. Esto se hace usando la ecuación dada anteriormente para P_{tr} .
4. Usando los parámetros predeterminados de HDM-4, calcular la potencia del motor y los accesorios $P_{engaccs}$.
5. La potencia de tracción se corrige para la eficiencia de la línea de transmisión utilizando el parámetro predeterminado en HDM-4 para obtener la potencia total de la siguiente ecuación:

$$P_{tot} = \frac{P_{tr}}{edt} + P_{engaccs}$$

6. Dividir el combustible entre la potencia total (P_{tot}). Esto da el factor de conversión de potencia a combustible ξ para esa potencia.
7. Realizar un análisis de regresión y ajustar los parámetros del modelo ξ_b y ehp en el modelo:

$$\xi = \xi_b \left(1 + ehp \frac{P_{tot}}{P_{max}} \right)$$

Donde:

P_{max} = Potencia máxima nominal para el vehículo

8. Si el análisis no permite la estimación simultánea de ξ_b y ehp , se asumen las relaciones predeterminadas de HDM-4 para ehp .

- Calibración de relaciones existentes

Hay dos formas de usar relaciones existentes para desarrollar los parámetros calibrados para α y ξ : generando datos y a través de los coeficientes del modelo.

a. Generando datos

- Usar los modelos existentes para generar una serie de predicciones de consumo de combustible que cubran la totalidad de las condiciones de circulación que se pueden encontrar, por ejemplo, velocidades, regularidad, pendientes, etc.
- Hacer una evaluación del rango de las condiciones que típicamente predominan, ponderar el conjunto de datos y clasificarlos. Por ejemplo:
 - El 70% opera en terrenos planos entre 50 y 80 km/h;
 - El 20% en terreno ondulado entre 40 y 70 km/h;
 - El 10% en terreno montañoso entre 20 y 50 km/h.
- Crear un conjunto de datos que contenga información que refleje las evaluaciones del punto (2). Esto asegurará que los resultados tengan ponderaciones apropiadas.
- A partir de este conjunto de datos, seguir las instrucciones dadas anteriormente para la calibración con datos de combustible sin procesar.

b. Coeficientes del modelo

Como se describe en NDLI (1997), una forma comúnmente utilizada para calibrar el modelo ajustado a los datos del consumo de combustible es:

$$SFC = A0 + \frac{A1}{S} + (A2 S^2) + (A3 IRI) + (A4 RS) + (A5 FL)$$

Donde:

SFC	= Consumo de combustible específico (1/1000 km)
A0 a A5	= Coeficiente de regresión
S	= Velocidad (km/h)
RS	= Subida (m/km)
FL	= Bajada (m/km)

Como se observa, el modelo es compatible con el de HDM-4. Los siguientes son los parámetros que relacionan los dos modelos:

Tabla 3.38 Coeficientes de regresión y ajuste de parámetros del modelo de consumo de combustible

Regresión	HDM-4
A0 + A3 IRI	(ξ /edt) R3
A1	3600 ξ Pengaccs
A2	(ξ /edt) (R1 + R4)/(3,6 ²)
A4	(ξ /edt) R2

Fuente: Manuales de HDM-4

Los términos A0 y A3 están principalmente relacionados con la resistencia a la rodadura; A1 con el combustible requerido para operar el motor; A2 con la resistencia aerodinámica, y A4 con la resistencia a la pendiente.

La calibración se realiza de la siguiente manera:

- Calcular el SFC para un rango de condiciones similares a las descritas bajo “generación de datos”.
- El consumo de combustible inactivo α está dado por $A1/3600$, o ξ Pengaccs.
- Restar $A1/S$ del SFC total para obtener el consumo de combustible debido a las fuerzas opuestas al movimiento. Convertir esto al IFC en ml/s dividiendo SFC por la velocidad.
- Calcular la potencia de tracción total usando las ecuaciones de HDM-4 con las características del vehículo y dividirla por la eficiencia de la línea de transmisión.
- Calcular ξ dividiendo IFC por la potencia de tracción, corregida para la eficiencia de la línea de transmisión.

Para un mayor detalle en cuanto a la calibración del modelo de combustible, es posible referirnos a la tesis de grado de doctorado titulada “Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones” elaborada por John Jairo Posada Henao, en la cual, el Capítulo 3 explica de manera detallada los modelos para estimar el consumo de combustible, entre ellos, el relacionado con HDM-4. Así mismo, en el Anexo A se realiza la descripción del modelo de consumo de combustible del HDM-4.

Cabe resaltar, que dentro de la investigación realizada por el Ingeniero Posada (2012), durante el estudio del modelo inmerso en el HDM-4 se encontró que una de las fórmulas o ecuaciones matemáticas que se tiene en los manuales presenta un error que conlleva a estimar de forma equivocada el consumo de combustible, por lo que se realizaron las consultas respectivas ante los desarrolladores del software confirmando que efectivamente se tenía un error de edición pues el programa computacional está

funcionando con la expresión en forma correcta; se trata en detalle de la ecuación (5.9) en la página E2-37 del Volumen 4 de los manuales del HDM-4; el error consiste en que el denominador aparece como (NUM_WHEELS * CS)/1000, pero lo correcto es NUM_WHEELS * CS * 1000. Esta información junto con la ecuación se presenta en el Anexo 1 – Costos de transporte motorizado.

3.4.2.5. Ruido de la aceleración. El ruido de aceleración en HDM-4 se usa para predecir los efectos de las variaciones de la velocidad debido a la congestión o a las condiciones de la carretera en los costos de operación del vehículo. Es un parámetro relativamente sencillo de medir y se puede hacer a través de un pequeño experimento controlado.

Si un vehículo tiene las mismas velocidades de arranque y parada en una sección, la aceleración media será cero. Por lo tanto, HDM-4 utiliza la desviación estándar de la aceleración, llamada **ruido de la aceleración** para representar la magnitud de las aceleraciones; cuanto mayor sea el ruido de aceleración, mayor será la magnitud de las aceleraciones.

En HDM-4 el ruido de la aceleración es una función de:

- Interacciones del tránsito (es decir, la relación volumen-capacidad)
- Conductor (σ_{adr})
- Regularidad (σ_{airi})
- Perfilado de la carretera (σ_{aal})
- Tránsito no motorizado - TNM (σ_{anmt})
- Fricción lateral (σ_{asf})

El ruido total de la aceleración se calcula como:

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{at}^2 + \sigma_{an}^2}$$

Donde:

σ_a = Ruido de la aceleración (m/s²)

σ_{at} = Ruido del tránsito (m/s²)

σ_{an} = Ruido natural (m/s²)

El ruido natural se calcula como:

$$\sigma_{an} = \sqrt{\text{MAX}((\sigma_{adr}^2 + \sigma_{aal}^2), \sigma_{asf}^2, \sigma_{anmt}^2, \sigma_{airi}^2)}$$

HDM-4 utiliza una función sigmoideal para las interacciones del tránsito y una función lineal para las demás. Los ruidos de la aceleración se combinan para obtener el ruido total de la aceleración para una sección de carretera determinada.

Una calibración de nivel 2 de cualquiera de los modelos consiste en realizar mediciones en dos extremos y asumir que se aplica el modelo existente. La calibración de nivel 3 recuantifica las formulaciones del modelo.

No es necesario calibrar todos los componentes del modelo. Si se está trabajando solamente con los efectos de las mejoras de capacidad, el modelo de interacción del tránsito y posiblemente el modelo de fricción lateral del TNM, deben ser calibrados. Si se requiere únicamente considerar las mejoras de regularidad, solo es necesario calibrar el modelo de regularidad.

- Medida del ruido de la aceleración

Para medir el ruido de la aceleración es necesario disponer de un vehículo equipado con algún tipo registrador de datos. Este registrador de datos debe medir la velocidad o la aceleración en intervalos de 1 segundo. La medición directa de la velocidad se recomienda realizarla por medio de un acelerómetro, ya que con este equipo es posible identificar las secciones planas de la carretera para eliminar los efectos de la pendiente.

Un equipo adecuado generalmente incorpora un registrador de datos que controla la velocidad o la aceleración de forma instantánea. Los sistemas basados en la velocidad son más fáciles de usar que los acelerómetros ya que los datos se pueden analizar directamente para establecer el ruido de la aceleración.

Uno de estos dispositivos, con funciones especialmente diseñadas es el ROMDAS, que mide la velocidad de los vehículos y contiene rutinas de procesamiento de datos diseñadas para calibrar el modelo de ruido de la aceleración de HDM-4.

Independientemente de los componentes del modelo de ruido de la aceleración que se estén investigando, el enfoque básico es el mismo:

- Equipar un vehículo con el dispositivo de medición. El vehículo debe ser tan representativo de los vehículos tipo como sea posible. Lo ideal es hacer mediciones con varios vehículos y conductores, sin embargo, NDLI (1995a) encontró que los resultados eran muy similares, por lo tanto, esto no es crítico.
- Se debe establecer una ruta de prueba que permita monitorear los dos puntos críticos: de bajo y de alto impacto.
- Por ejemplo, si la regularidad es alta, se deben realizar varias mediciones en la carretera para baja y alta regularidad, especialmente para impactos del tránsito en carreteras no congestionadas y altamente congestionadas. Es vital que todos los demás atributos de la carretera, por ejemplo, ancho, perfilado, composición del tránsito, sean similares.
- Es importante que la carretera sea lo suficientemente extensa para estabilizar el proceso. Se supone que las aceleraciones son aleatorias y, si se utiliza una carretera demasiado corta, el proceso no se estabilizará. De esta manera, se recomienda recoger una muestra mínima de 5 minutos en un solo trayecto para cada atributo de interés.

- Calibración del ruido de aceleración debido al comportamiento del conductor

Esta variable siempre se debe calibrar. El ruido de aceleración debido al comportamiento del conductor es el ruido que surge cuando un vehículo es conducido bajo condiciones normales de operación sin efectos del tránsito, de la regularidad, del perfilado, del TNM o efectos de la fricción lateral.

Las mediciones deben realizarse en una carretera estándar que se encuentre en las mejores condiciones disponibles para el tipo de carretera deseado. El software HDM-4

permite la entrada de datos para diferentes clases de carreteras, por lo que se pueden realizar mediciones, por ejemplo, en autopistas de dos carriles y vías multicarril.

Si no se realizan otras mediciones (por ejemplo, perfilado) se asume que el ruido natural se debe completamente al comportamiento del conductor: $\sigma_{an} = \sigma_{adr}$.

- Calibración del ruido de aceleración del tránsito

Una calibración de nivel 2 del modelo del ruido de aceleración del tránsito implica tomar medidas en condiciones de mucha congestión. Esto proporciona el ruido máximo (σ_{amax}). Dado que las mediciones también incluyen el ruido natural, el ruido máximo del tránsito (σ_{atmax}) se calcula como:

$$\sigma_{atmax} = \sqrt{\sigma_{amax}^2 + \sigma_{an}^2}$$

El valor de σ_{atmax} se usa junto con una relación sigmoideal para predecir el ruido de aceleración del tránsito en relaciones intermedias de volumen-capacidad.

- Regularidad, perfilado, TNM y fricción lateral

Todos estos parámetros suponen una relación lineal entre la severidad y el ruido de la aceleración. Las mediciones se toman en condiciones extremas, por ejemplo, una regularidad de 20 IRI m/km y el ruido se interpola linealmente desde un valor de 0 a esta condición extrema. Las mediciones se realizan de la siguiente manera: (el ejemplo se aplica a la regularidad, pero se puede hacer de la misma forma para los otros factores).

- Identificar las secciones de la carretera con regularidades bajas y altas que son idénticas (es decir, perfilado, tránsito, fricción en el borde de la carretera, etc).
- Medir el ruido de la aceleración en las secciones de baja y alta regularidad en ausencia de cualquier otra interacción del tránsito.
- Establecer la diferencia entre estos valores. Esto representa el cambio máximo debido a la regularidad.

La regularidad se determinó de acuerdo con lo descrito en el numeral 3.4.2.1. Predicción de la velocidad. Los demás factores se determinaron de acuerdo con la información consignada en las tablas del análisis de sensibilidad incluidas en el Anexo 6.

3.4.2.6. Piezas y costos de mano de obra. Para estas variables, una calibración de Nivel 2 debe enfocarse en la magnitud de los costos y los efectos de la regularidad.

La magnitud de los costos se obtiene al encuestar a una muestra de usuarios y posteriormente establecer un costo promedio para luego ajustar las predicciones del modelo de mano de obra en HDM-4 con el fin de que el costo previsto sea el mismo costo estudiado en las condiciones promedio.

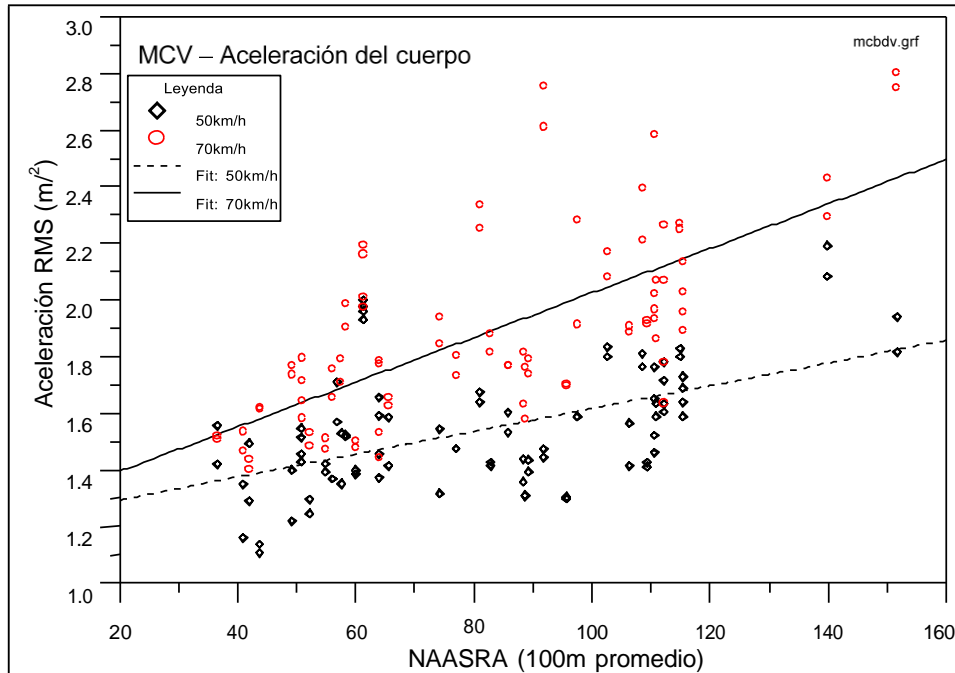
Una de las alternativas para establecer estos valores fue propuesta por Opus (1999), quien presentó los resultados de un estudio que utiliza acelerómetros para investigar los efectos de la regularidad en el consumo de piezas.

En el método propuesto se pudo observar que las aceleraciones del cuerpo aumentan con el aumento de la regularidad, lo cual se puede utilizar para calibrar los efectos de regularidad en el modelo de consumo de piezas de HDM-4. También se observó que, a bajas regularidades, las aceleraciones no tienen mucho impacto. Esto puede usarse

para confirmar el nivel de regularidad por debajo del cual no hay impacto en el consumo de partes. La Figura 3.17 es un ejemplo de las aceleraciones corporales frente a la regularidad para camiones medianos.

Un hallazgo de esta investigación que no se considera en HDM-4 es la dependencia de la velocidad-regularidad. Los resultados muestran claramente que cuanto mayor es la velocidad, mayor es el impacto de la regularidad en las aceleraciones corporales.

Figura 3.17 Efecto de la regularidad en la aceleración del cuerpo – Opus (1999)



Fuente: Manuales de HDM-4

3.4.2.7. Potencia utilizada. Para una calibración de nivel 2, la potencia de conducción se establece midiendo las velocidades en las pendientes. Como se describe en Bennett (1994), se pueden usar dos enfoques: velocidades observadas y diferencias de velocidad (o método espacial).

- Velocidades observadas

En un trayecto largo e inclinado, los vehículos viajarán a una velocidad de arrastre constante donde todas las fuerzas están en equilibrio. Como no hay aceleración, la velocidad observada se puede sustituir en la siguiente ecuación para calcular la potencia utilizada:

$$\frac{Pu}{M'} = a v + \frac{0,5 RHO CD CDmult AF + R3}{M'} v^3 + \frac{R4}{M'} v + \frac{Mg GR}{100 M'} v$$

Donde:

- Pu = Potencia utilizada (W)
- v = Velocidad del vehículo (m/s)
- M' = Masa efectiva (km)
- RHO = Densidad de la masa del aire (kg/m³)
- CD = Coeficiente de resistencia aerodinámica
- CDmult = Multiplicador del coeficiente de arrastre aerodinámico

AF	= Área frontal proyectada
R3 y R4	= Componentes de la resistencia a la rodadura
GR	= Pendiente (%)
g	= Aceleración debida a la gravedad (m/s ²)

El cálculo y análisis de las velocidades observadas (velocidades medidas) se encuentra incluido para cada tipo de vehículo en el Anexo 6. En el Anexo 6.2, a partir del cálculo del modelo de velocidad, se determina y analiza el modelo de capacidad – velocidad.

- Diferencias de velocidad

Cuando las pendientes son insuficientes para que los vehículos alcancen la velocidad de arrastre, la reducción de velocidad entre dos puntos en la pendiente se puede usar para establecer la potencia de conducción. Esto se conoce como diferencia de velocidad o método espacial y utiliza la siguiente ecuación para establecer la potencia utilizada:

$$\frac{\overline{Pu}}{M'} = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2T} + \frac{0,5 RHO CD CDmult AF + R3 \left(\frac{SL}{T}\right)^3}{M'} + \frac{R4 SL}{M' T} + \frac{Mg HC}{M' T}$$

Donde:

\overline{Pu}	= Potencia media usada en una sección
v_1	= Velocidad a la salida de una sección (m/s)
v_0	= Velocidad a la entrada de una sección (m/s)
SL	= Longitud de la sección (m)
T	= Tiempo necesario para recorrer la longitud de la sección (s)
HC	= cambio de altura sobre la sección (m)

Este método proporciona la potencia promedio utilizada en la sección, a diferencia del método de velocidad de rastreo que proporciona la máxima potencia utilizada.

Bennett (1994) comparó estos dos métodos y concluyó que ambos darán resultados similares, y que el método espacial dará mejores resultados cuando las mediciones se realicen lo más lejos posible de la pendiente. Cuando se utiliza el método espacial, existe una relación casi lineal entre la potencia prevista utilizada y la distancia medida. Por lo tanto, cualquier error en las distancias medidas dará lugar a una sobreestimación o subestimación correspondiente de la potencia utilizada.

Es probable que la potencia utilizada sea proporcional a la pendiente, con vehículos que usan más potencia en pendientes más inclinadas (Bennett, 1994). Sin embargo, el software HDM-4 solo permite la entrada de un único valor, por lo que se debe adoptar el promedio o un valor basado en el gradiente más típico.

3.4.2.8. Potencia de frenado. Para una calibración de Nivel 2, la potencia utilizada se puede calcular a partir de la velocidad de la misma manera que la potencia de conducción. Se puede usar el enfoque de velocidad observada o diferencia de velocidad (Bennett, 1994). Esto implica medir la velocidad del vehículo y luego calcular la potencia de frenado utilizada (que se expresa como -Pu).

3.4.2.9. Vida útil. El método de calibración de nivel 2 para estimar la vida útil se realiza mediante el uso de una curva de supervivencia. Esta es una curva que muestra la proporción del número original de vehículos que permanecen en servicio de una determinada edad. Las curvas para cada año original de registro son únicas, aunque se puede obtener una representación razonable mediante la evaluación de la edad de los vehículos en uso para una fecha o periodo determinado. Al comparar esta estructura de edad con la cantidad de unidades puestas en servicio originalmente cada año, se puede preparar una curva de cuasi-supervivencia a partir de la cual se puede calcular la vida útil promedio.

Para emplear una curva de supervivencia, es necesario tener una distribución por edades de la flota existente de vehículos y registros del número de vehículos originalmente registrados. En ciertas circunstancias, los datos de registro pueden no estar disponibles o no ser aplicables. Aun así, se puede construir una curva de supervivencia obteniendo dos distribuciones de edad con un año de diferencia. Esto mostrará la cantidad de vehículos retirados para cada grupo de edad a partir del cual se puede calcular una curva de supervivencia.

Estas técnicas darán la vida útil promedio para la flota como un todo, o una sección de la flota que opere en un área determinada, para lo cual es necesario estimar la regularidad ponderada por el tránsito para esta área a fin de ajustar el valor durante los cálculos de vida óptima a la regularidad en un pavimento.

3.4.2.10. Utilización. Para la variable utilización, en una calibración de nivel 2 se requiere una encuesta de campo. Generalmente, esto implica detener una muestra de vehículos y registrar sus lecturas de odómetro o, para vehículos comerciales, consignar datos del libro de registro del conductor. En algunos países, estos datos están disponibles a través de compañías de gestión de flotas vehiculares. Los datos se deben agrupar por edad con el kilometraje promedio anual de todos los vehículos de una edad determinada que se calcule. Si se dispone de una curva de supervivencia, el kilometraje promedio de vida se puede calcular multiplicando el kilometraje anual promedio de cada año por la tasa de supervivencia. El total de estos productos representa el kilometraje promedio de vida. El kilometraje anual promedio se calcula como el kilometraje promedio de vida dividido por la vida útil promedio.

Si no se dispone de una curva de supervivencia, se obtendrá una estimación razonable del kilometraje promedio anual calculando el kilometraje promedio de todos los datos de la encuesta. Si la muestra es imparcial, esto debería arrojar un valor similar al de la técnica de la curva de supervivencia.

3.4.2.11. Consumo de aceite. El consumo de aceite se divide en dos componentes:

- Pérdida de aceite debido a la contaminación.
- Pérdida de aceite debido a la operación.

La pérdida de aceite debido a la contaminación es función de la distancia entre los cambios de aceite. La pérdida de aceite debido a la operación es función del consumo de combustible.

Las pérdidas por contaminación se pueden calibrar estableciendo las distancias típicas entre los cambios de aceite. Estos pueden estar basados en las especificaciones del fabricante, pero muy probablemente sean diferentes. Las pérdidas se calculan como:

$$OILCONT = \frac{OILCAP}{DISTCHG}$$

Donde:

OILCONT = Pérdida por la contaminación (l/1000 km)

OILCAP = Capacidad de aceite del motor (l)

DISTCHG = Distancia entre cambios de aceite (km)

La pérdida de aceite debida a la operación es más difícil de medir y, como probablemente tenga un impacto limitado en los costos totales, generalmente no se debe calibrar. Si se desea calibrar para una muestra de vehículos, se debe hacer de la siguiente manera:

- Cambiar el aceite y reemplazarlo por una cantidad conocida de aceite.
- Operar los vehículos durante al menos 5.000 km a 10.000 km, manteniendo registros exactos de la cantidad de combustible utilizado y, si es necesario, agregar aceite adicional.
- Al final del período, vaciar completamente el aceite y medir la cantidad restante. La diferencia entre este volumen y el volumen inicial es la pérdida de aceite debido a la operación. Dividiendo esto por el consumo total de combustible, se obtiene la tasa de pérdida por la operación.

3.4.3. Calibración de variables de nivel 3 para vías de Boyacá – Adaptación del modelo. A continuación, se describen de manera general las variables para vías de Boyacá que corresponden al nivel 3 y que son utilizadas, especialmente, para adaptación del modelo. De acuerdo con lo indicado en capítulos anteriores, el nivel de calibración 3 únicamente se tiene en cuenta para la descripción de las variables y su incidencia en el modelo, además teniendo en cuenta que estas se encuentran incluidas en la guía de adaptación y calibración de HDM-4 y de ahí la importancia de incluirlas.

3.4.3.1. Ruido de la aceleración. En comparación con una calibración de nivel 2, la calibración de nivel 3 para el ruido de aceleración puede abordar:

- Cuantificación de parámetros para clases de vehículos adicionales o para otros tipos de carretera.
- Desarrollo de relaciones alternativas.

Al expandir los datos a clases de vehículos adicionales, los experimentos se realizarían de manera similar al nivel 2, pero con una matriz más grande de vehículos, conductores y condiciones de la carretera. Desarrollar relaciones alternativas abordaría las suposiciones clave en el ruido del tránsito y la regularidad / perfilado / TNM / relaciones de fricción lateral.

- Calibración del ruido del tránsito

El modelo del ruido del tránsito es una función sigmoideal que ofrece diferentes predicciones según la relación volumen-capacidad (VCR) y el volumen donde las velocidades comienzan a verse afectadas por las interacciones del tránsito (Q₀). Este

último integra el modelo de ruido del tránsito con el modelo de flujo de velocidad de HDM-4 de modo que cuando $VCR < Q_0$ solamente hay ruido natural; por encima de la combinación de ruido natural y de tránsito. La forma del modelo en HDM-4 es:

$$\sigma_{at} = \sigma_{atmax} \frac{1,04}{1 + e^{(a_0 + a_1 VCR)}}$$

El esfuerzo debe enfocarse en calibrar los parámetros a_0 y a_1 y luego desarrollar una nueva forma de modelo alrededor de los parámetros calibrados. Esto implicará tomar medidas de σ_{at} en diferentes niveles de VCR y luego ajustar una curva con los datos. Debido a las dificultades para estimar la VCR, se recomienda que las encuestas se realicen a niveles de VCR de 1, 0,5 y 0,3. Esto proporcionará una indicación de la tendencia en los datos. Se pueden realizar medidas adicionales para complementar los datos según sea necesario.

3.4.3.2. Regularidad, perfilado, TNM y fricción lateral. La suposición es que existe una relación lineal entre estos factores y el ruido de aceleración. Si es posible recolectar datos sobre un rango de condiciones de la carretera a estudiar, demostraría la validez de esta suposición. Por lo tanto, es importante que todos los factores acá incluidos se mantengan constantes de manera que el único factor que influya en los resultados sea el factor de interés de estudio (ruido de aceleración).

3.4.3.3. Velocidad β . La cuantificación de la velocidad β requiere un importante estudio de campo. Se requiere una serie de datos de velocidad que cubran la escala total de condiciones bajo las cuales se aplicarán los modelos de velocidad restringida.

Este conjunto de datos debe analizarse utilizando los mismos métodos estadísticos que los descritos en Watanatada et al. (1987c). El análisis debe considerar los mismos problemas, tales como las transformaciones logarítmicas y recuantificar el modelo a partir de los primeros principios.

3.4.3.4. Otros parámetros. Otros parámetros a tener en cuenta dentro de una calibración de nivel 3, que no son, sin embargo, objeto de análisis en el presente estudio, se relacionan a continuación:

- Resistencia a la rodadura
- Consumo de combustible inactivo
- Eficiencia del combustible
- Longitud crítica de la pendiente
- Rigidez de los neumáticos
- Energía de los accesorios del motor
- Potencia de arrastre del motor
- Eficiencia de la tracción
- Parámetros del desgaste de neumáticos
- Consumo de piezas
- Horas de trabajo

Teniendo en cuenta que estos “otros parámetros” no se incluyen para análisis y desarrollo dentro de la guía de calibración y adaptación Versión 1.0 en el nivel 3 de calibración que corresponde al volumen V del paquete de documentación de HDM-4, tomada como base para el estudio, no se tendrán en cuenta en la presente tesis de grado, debido a no contar con información suficiente para la descripción o análisis de estas variables. Para el análisis de estos parámetros, se recomienda que sean incluidos

en posteriores estudios, tomando como referencia la guía de calibración y adaptación de los manuales de HDM-4 en su versión más reciente, una vez se cuente con la disponibilidad de la información correspondiente.

4. PARÁMETROS SUGERIDOS PARA EL MODELO RUE EN VÍAS DE BOYACÁ

El presente capítulo contiene los datos y parámetros de entrada para el modelo RUE a partir de los costos de usuarios y presenta en detalle los datos de entrada de la flota vehicular definidos para dos tramos de vías del Departamento de Boyacá, así como la herramienta RUC-Boyacá adaptada a las condiciones locales y los valores recomendados por defecto para el análisis de proyectos viales en el Departamento aplicando el sistema HDM-4 para los niveles de calibración 1 y 2. En los Anexos 4 y 5, en hojas de cálculo de Excel, se incluye toda la información relacionada con este Capítulo. En el Anexo 4 se incluyen los parámetros sugeridos para los datos de entrada de la flota vehicular, en el Anexo 5 se incluyen los datos recomendados de la herramienta RUC-Boyacá, ambas adaptados a las condiciones locales y en el Anexo 6 se presentan los diferentes archivos relacionados con el análisis de sensibilidad para los diferentes escenarios.

4.1. ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS PARA LAS CONDICIONES LOCALES

A continuación, se realizará una descripción del proceso de adaptación de los modelos para las condiciones del Departamento de Boyacá, específicamente en los parámetros que se encuentran relacionados con las “Características de la vía” contenidas en la herramienta desarrollada para la evaluación del modelo de la presente tesis de grado, la cual se denomina “RUC”. Esta herramienta se adaptó para el presente proyecto y guarda relación con el módulo de efectos sobre los usuarios que se encuentra contenido en el HDM-4; razón por la cual, permitirá establecer qué parámetros requieren calibración, en etapas subsiguientes al estudio. Es fundamental asegurar que los resultados obtenidos en los modelos, reflejen las condiciones reales de las vías del Departamento de Boyacá, que, junto con los datos de entrada recopilados en el Capítulo 3, se pueda realizar una evaluación económica adecuada. Si los datos y modelos no reflejan la realidad, la planificación de intervenciones y priorización de recursos no será correcta.

Con el fin de realizar la evaluación económica de un proyecto, es necesario contar con los costos y beneficios a lo largo del período de análisis. La mayoría de los beneficios se generan por una reducción de los costos de transporte, por lo tanto, es esencial predecir de una forma adecuada los costos de transporte bajo diferentes alternativas de inversión para poder realizar una acertada evaluación económica.

Teniendo en cuenta que, previamente se definieron los datos de entrada correspondientes a la flota vehicular en el Departamento de Boyacá (Ver Anexo 4), así como los parámetros de calibración de la flota vehicular (Numera 3.3 y Anexo 4), los cuales hacen parte de la información básica del sistema para la evaluación del módulo de Efectos sobre los Usuarios de las Carreteras (Road User Effects) contenidos en el HDM-4, estos mismos datos de entrada, se deben incluir como información básica dentro la herramienta RUC “Sistema de Cálculo de Costos de Usuarios” para las vías de Boyacá, que se basa estrictamente en el modelo RUCKS versión 2.0 desarrollado por el Banco Mundial.

4.1.1. Características de la vía. Los datos de entrada que se solicitan como parte de las características de la vía se encuentran agrupados en las siguientes categorías: condición de la vía, geometría de la vía, factores de ajuste de velocidad, factores de resistencia a la rodadura, tráfico vial, índice de accidentes en flota vehicular, patrón de flujo y velocidad del tráfico, los cuales se definen a continuación. Los valores adoptados para el Departamento de Boyacá se presentan en el Anexo 5. La siguiente figura presenta una vista general de la hoja “Características de la vía.”

Figura 4.1 Datos de Entrada – Características de la Vía RUC – Boyacá

Características de la Vía

Condición de la calzada				Geometría de la calzada				
Rugosidad de la Vía (IRI, m/km)	Ancho de la Vía (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Grava/ 4 - Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)	
3,5	10,2	1	1	1	10	2,0	2810	

Factores de Ajuste de Velocidad				Factores de Resistencia a la Rodadura		
Velocidad Limite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Limite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70

Tránsito Vial		Índice de Accidentes en Flota Vehicular		
Descripción de Vehículo	Tránsito promedio Diario Anual TPDA	Número por cada 100 millones de vehículos-km	Accidente Fatal	Daños Serios
Motocicleta	667			
Taxi	3979			
Liviano particular	35			
Utilitario	37			
Bus Liviano	95			
Bus Mediano	158			
Bus Grande	387			
Camión Liviano	53			
Camión Mediano	50			
Camión Pesado	12			
Camión Articulado	21			
Bus Articulado	0			
Total	5494		3	30

Fuente: Elaboración propia utilizando RUC.

Los datos presentados en la Figura 4.1 constituyen un escenario para un análisis aplicable para las vías de Boyacá y los cuales se usaron para el análisis realizado en la presente tesis.

4.1.1.1. Condición de la vía. Los datos de condición de la vía utilizados en el modelo, se refieren a parámetros básicos como ancho de la vía, regularidad y tipo de superficie. La importancia de estos parámetros básicos se encuentra relacionada con los efectos que estos pueden ocasionar sobre la velocidad, combustible, consumo de partes y repuestos y, en consecuencia, los efectos sobre los costos de usuarios de las vías. Los principales parámetros incluidos en esta categoría son:

- Regularidad de la vía (m/km): IRI. Valor utilizado 3,5 m/km.
- Ancho de la vía (m): se encuentra delimitado por la distancia entre andenes laterales (no separadores) por donde circulan los vehículos. Para el caso de carreteras, el valor de entrada incluye la berma.
- Tipo de Superficie de la vía (m): flexible, rígido, afirmado o tierra. En este caso se realizó el análisis para un pavimento flexible.

4.1.1.2. Geometría de la vía. La geometría de la vía se refiere a parámetros básicos como subidas y bajadas en la vía, expresadas en m/km, número de subidas y bajadas por km, curvatura horizontal (grados/km), superelevación, altitud. La importancia de estos parámetros básicos se encuentra relacionada con los efectos que estos pueden ocasionar sobre la velocidad, combustible, consumo de partes y repuestos y, en consecuencia, los efectos sobre los costos de usuarios de las vías.

Estos valores se encuentran referenciados en el análisis de sensibilidad y hacen parte de la calibración del modelo a través de la herramienta RUC-Boyacá, que se encuentra en el Anexo 6.

4.1.1.3. Factores de ajuste de velocidad. Los factores de ajuste de velocidad se definen como aquellos factores que influyen en la vía de manera que no se pueda lograr la velocidad a flujo libre. Dentro de estos ajustes se tiene la velocidad límite, el factor de cumplimiento de la velocidad límite, fricción de la vía, fricción del tránsito no motorizado, los cuales se enuncian a continuación:

- **Velocidad límite (km/h):** Este parámetro se refiere a la velocidad máxima permitida por la ley en el país y/o ciudad.
- **Factor de Cumplimiento de la Velocidad límite:** Es la velocidad con la que circula el tránsito por encima del límite de velocidad en condiciones ideales.
- **Fricción de la vía:** Este valor es un factor de reducción de la velocidad deseada debido a actividades en la vía, por ejemplo, parada de buses, paradas en la vía y puntos de acceso en la vía.
- **Fricción del tránsito no motorizado (#):** Este valor es un factor de reducción de la velocidad deseada debido a la presencia de transporte no motorizado, por ejemplo, peatones, bicicletas y carros de tracción animal.

Estos valores se encuentran referenciados en el análisis de sensibilidad y hacen parte de la calibración del modelo a través de la herramienta RUC-Boyacá, que se encuentra en el Anexo 6.

4.1.1.4. Factores de resistencia a la rodadura. Los factores de resistencia a la rodadura se encuentran relacionados con factores climáticos que afectan la rodadura sobre las vías, así como la textura de la misma. Dentro de estos factores se encuentra el porcentaje del tiempo que se conduce sobre agua, porcentaje del tiempo que se conduce sobre nieve y la profundidad de textura de vías pavimentadas (mm).

Estos valores se encuentran referenciados en el análisis de sensibilidad y hacen parte de la calibración del modelo a través de la herramienta RUC-Boyacá, que se encuentra en el Anexo 6.

4.1.1.5. Patrón de flujo de tránsito. El patrón de flujo de tránsito es la definición de la distribución de tránsito anual durante el año. El día de un año es dividido en 5 períodos desde el período con mayor congestión hasta el período de menor congestión; así mismo para cada período se necesita definir:

- Número de horas en cada período
- Porcentaje de tránsito anual en cada período.

Estos valores se encuentran referenciados en el análisis de sensibilidad y hacen parte de la calibración del modelo a través de la herramienta RUC-Boyacá, que se encuentra en el Anexo 6.

4.1.1.6. Parámetros del modelo velocidad – flujo. Los factores de tipo de velocidad de tránsito se encuentran relacionados con factores de capacidad máxima, capacidad a flujo libre, capacidad nominal, velocidad de embotellamiento a máxima capacidad y el número de carriles de la vía. Estos parámetros fueron calibrados de acuerdo con las condiciones del Departamento de Boyacá, mediante el modelo flujo – velocidad (Anexo 6.2) y se mencionan a continuación:

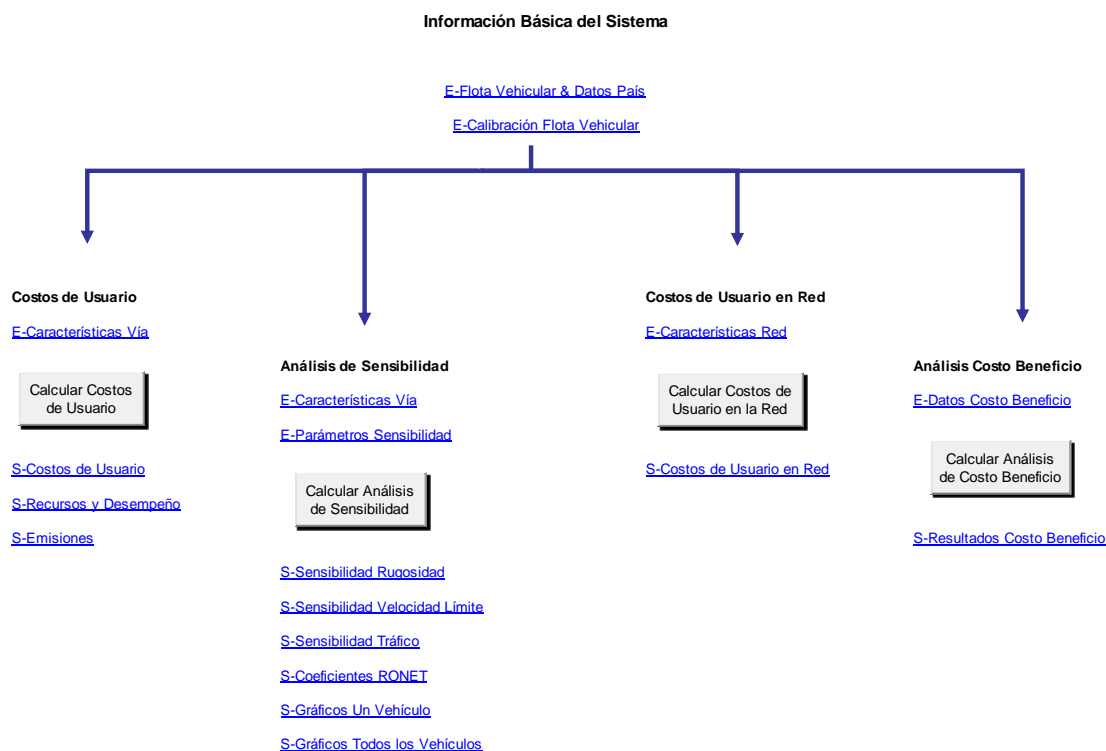
- **Capacidad máxima (PCSE/hora/carril):** la capacidad máxima de la vía expresada en equivalencia del espacio del vehículo, el cual es el máximo número de vehículos que pueden pasar un punto o atravesar un tramo de una vía en una hora.
- **Flujo a velocidad libre (pcse/hora/carril):** Este parámetro se expresa como una fracción de la capacidad máxima, la cual indica el nivel de flujo bajo el cual las interacciones de tráfico son insignificantes.
- **Flujo Nominal (pcse/hora/carril):** Este parámetro se expresa como una fracción de la capacidad máxima, la cual indica el nivel de flujo en el que las velocidades de todos los vehículos son las mismas y comienzan a disminuir a la misma tasa con el incremento en el tráfico.
- **Velocidad de embotellamiento a máxima capacidad (km/hora):** La velocidad de embotellamiento a máxima capacidad, expresada en km/hora, representa las velocidades del vehículo a máxima capacidad.

Estos valores se encuentran referenciados en el análisis de sensibilidad y hacen parte de la calibración del modelo a través de la herramienta RUC-Boyacá, que se encuentra en el Anexo 6.

4.1.2. Herramienta RUC para determinación de costos de usuarios. Esta herramienta ha sido diseñada para calcular los costos unitarios de usuarios de la red vial relacionados con los parámetros de velocidad, tiempos de viaje, costos de operación vehicular y emisiones, adoptando el Modelo de Estándares para Diseño y Mantenimiento Vial HDM-4 (Highway Development and Management Model) Version 2.01. Adicionalmente, permite calcular costos de seguridad vial teniendo en cuenta la metodología del Programa Internacional de Evaluación de Vías - iRAP (International Road Assessment Programme (Ver Figura 4.2). La herramienta RUC se crea teniendo en cuenta los modelos aplicables para la Ciudad de Bogotá de acuerdo con el convenio administrativo indicado en el numeral 1.6.1. Contrato de Consultoría No. IDU-BM-112 de 2009 entre el IDU y TNM LIMITED. Esta herramienta, diseñada inicialmente, para las condiciones de la Ciudad de Bogotá, fue creada y desarrollada por TNM LIMITED, sin embargo, debido a las condiciones similares en cuanto a las características de las regiones, se toma como base para el desarrollo de la presente tesis, ajustando los valores que son aplicables al Departamento de Boyacá. El Manual para el uso de la herramienta se incluye en el Anexo 9, con el fin de facilitar su comprensión, ejecución y análisis.

Figura 4.2 Interfaz principal de herramienta RUC – Boyacá

Sistema de Cálculo de Costos de Usuario



Basado en el Sistema RUCKS (HDM-4 RUC Model Version 2.01)

Fuente: Herramienta RUC.

Esta herramienta RUC, calibrada para las condiciones de Boyacá se encuentra en los Anexos 5 y 6, incluyendo todos los datos correspondientes a la flota vehicular adaptados a las condiciones en el Departamento de Boyacá, así como los valores recomendados para clasificar las vías.

Con el fin de realizar diferentes tipos de evaluación económica, se realizaron 4 calibraciones de la herramienta así:

- **RUC-Boyacá pesos financieros:** Se refiere a los costos financieros definidos para los consumos de la flota vehicular colombiana, expresada en pesos colombianos.
- **RUC-Boyacá pesos económicos:** Se refiere a los costos económicos definidos para los consumos de la flota vehicular colombiana, expresada en pesos colombianos.
- **RUC-Boyacá dólares financieros:** Se refiere a los costos financieros definidos para los consumos de la flota vehicular colombiana, expresada en dólares americanos, con una tasa representativa de mercado de 1 US = 2950 COP
- **RUC-Boyacá dólares económicos:** Se refiere a los costos económicos definidos para los consumos de la flota vehicular colombiana, expresada en dólares americanos, con una tasa representativa de mercado de 1 US = 2950 COP

Adicionalmente se elaboró un manual de usuario, incluido como Anexo 9, en el cual se define cada uno de los parámetros que contiene la herramienta de manera que el usuario lo utilice como guía de consulta para definir o modificar alguno de los parámetros predefinidos para las vías del Departamento de Boyacá, o considere realizar un análisis de sensibilidad de alguno de los parámetros principales que la componen. También se incluirá en el Anexo 5, los valores recomendados que sirven como referencia para emplearlos en caso de que no se cuente con información del corredor a evaluar.

4.1.2.1. Parámetros de entrada del modelo. Para evaluar las opciones del modelo, han sido definidos varios parámetros de entrada que permiten establecer las condiciones básicas de la región a evaluar, así como otros parámetros relacionados con la flota vehicular de la vía en cuestión. Los parámetros solicitados por la herramienta de Excel son los siguientes:

1. Datos de flota vehicular e información del país.

En este ítem, el sistema solicita las características básicas de la flota vehicular y el país a ser evaluado. La información requerida incluye información de costos económicos o financieros, relacionados con los tipos de vehículo que pueden ser evaluados para el país.

Figura 4.3 Datos e información de entrada de la flota vehicular

Datos de Flota Vehicular

Descripción del Vehículo	Costos Unitarios Económicos o Financieros (\$)										Características Básicas de Flota Vehicular							
	Vehículo Nuevo (\$/vehículo)	Neumático Nuevo (\$/neumático)	Combustible (\$/litro)	Aceite Lubricante (\$/litro)	Trabajo de Mantenimiento (\$/hora)	Salario del Operador (\$/hora)	Gastos Anuales (\$/año)	Interés Anual (%)	Tiempo de Trabajo de Pasajero (\$/hora)	Tiempo de No-Trabajo de Pasajero (\$/hora)	Tiempo de Acarreo de Carga (\$/hora)	Kilómetros Anuales Conducidos (km)	Horas de Trabajo Anuales (horas)	Vida de Servicio (años)	Uso Privado (%)	Número de Pasajeros de Trabajo (n)	Viejes de Pasajero de Trabajo (%)	Peso Bruto del Vehículo (t)
Motocicleta	4.220,00	74790,00	1445,26	11279,49	3703,00	0,00	594,588	7,5	2932,00	697,00	0,00	15,560	815	6	100	1,264	41	0,1
Taxi	29.760,00	100000,00	1445,26	15519,02	8888,88	6250,00	3.929,000	7,5	2627,00	788,10	0,00	87,360	3.626	10	100	1,264	22	0,8
Liviano particular	34.950,00	108319,00	1445,26	15519,02	8888,88	0,00	425,471	7,5	2719,00	815,70	0,00	20,000	791	10	100	1,264	35	1,1
Utilitario	61.990,00	362101,00	1445,26	15519,02	8888,88	0,00	634,966	7,5	2719,00	815,70	0,00	20,000	791	10	100	1,264	35	1,5
Bus Liviano	96.680,00	436134,00	1655,82	13720,68	10900,00	10937,00	2.634,504	7,5	1650,00	495,00	0,00	47,100	2.479	20	0	11,5	28	3,5
Bus Mediano	156.260,00	695942,00	1655,82	13720,68	16668,00	12030,70	2.949,126	7,5	1650,00	495,00	0,00	47,194	2.483	20	0	30,23	28	10,4
Bus Grande	424.800,00	1148655,00	1655,82	13720,68	16668,00	12030,70	2.949,126	7,5	1650,00	495,00	0,00	47,760	2.514	20	0	48,36	28	25,1
Camión Liviano	103.300,00	331008,00	1655,82	13720,68	11600,00	12500,00	2.356,437	7,5	0,00	0,00	0,00	46,670	2.456	35	0	0	0	5,2
Camión Mediano	197.950,00	645378,00	1655,82	13720,68	11600,00	12500,00	2.356,437	7,5	0,00	0,00	0,00	43,330	2.281	35	0	0	0	15,0
Camión Pesado	297.500,00	1148655,00	1655,82	13720,68	13298,90	12500,00	2.582,025	7,5	0,00	0,00	0,00	20,000	1,235	35	0	0	0	28,5
Camión Articulado	378.200,00	1338571,00	1655,82	12122,15	15454,56	12500,00	2.738,748	7,5	0,00	0,00	0,00	20,000	1,235	35	0	0	0	48,0

País y Moneda

Nombre de País	Moneda	Año
Boyacá	\$	2018

Costos Unitarios de Emisiones

Costos Unitarios de Emisiones (\$ por tonelada)						
Dióxido de Carbono	Monóxido de Carbono	Hidrocarburos	Nitrógeno	Partículas	Dióxido de Sulfuro	Plomo
37,000	1.850,000	4.070,000	4.625,000	56.425,000	1.480,000	-

Costos de Seguridad Vial

Costos de Seguridad Vial	
PIB per cápita (\$/persona)	21.349.150
Factor multiplicador de PIB per cápita para obtener costo de accidentes fatales	70
Costo de lesiones graves como porcentaje de costo de accidentes fatales	25%
Costo de accidentes fatales (\$/accidente fatal)	1.494.440.500
Costo de lesiones graves (\$/lesión grave)	373.610.125

Fuente: Herramienta RUC.

Los parámetros de entrada están subdivididos según costos económicos o financieros, características básicas de la flota vehicular, información del país, costos de emisiones y costos en seguridad vial.

- Costos Económicos o Financieros
 - Vehículo Nuevo (\$/vehículo)
 - Neumático Nuevo (\$/neumático)
 - Combustible (\$/litro)
 - Aceite Lubricante (\$/litro)
 - Trabajo de Mantenimiento (\$/hora)
 - Salario del Operador (\$/hora)
 - Gastos Generales (\$/año)
 - Tasa de Interés (%)
 - Tiempo de Trabajo de Pasajero (\$/hora)
 - Tiempo de No-Trabajo de Pasajero (\$/hora)

- Retraso en Acarreo de Carga (\$/hora)
- b. Características Básicas de la Flota Vehicular
 - Kilómetros Conducidos Anualmente (km)
 - Horas Trabajadas Anualmente (horas)
 - Vida de Servicio (años)
 - Uso Privado (%)
 - Número de Pasajeros (#)
 - Viajes de Trabajo de Pasajeros (%)
 - Peso Bruto del Vehículo (toneladas)
- c. Información del País y Moneda
 - Nombre del País
 - Moneda
 - Año
- d. Costos Unitarios de Emisiones
 - Costos Unitarios de Emisiones (\$/tonelada)
- e. Costos de Seguridad Vial
 - PIB per cápita (\$/persona)
 - Factor multiplicador de PIB per cápita para obtener costos de accidentes fatales (#)
 - Costo de daños serios como porcentaje de costo de accidentes fatales (%)
 - Costo de accidentes fatales (\$/accidente fatal)
 - Costo de daños serios (\$/daño serio)

2. Datos de calibración de la flota vehicular

En este ítem son solicitados los parámetros de calibración de la flota vehicular a ser evaluada. Por defecto son presentados los valores del modelo HDM-4 y el usuario puede modificarlos para calibrar el modelo de costos de usuario y de esta forma, reflejar las condiciones locales.

Figura 4.4 Datos de calibración de la flota vehicular

Calibración de Flota Vehicular

Descripción del Vehículo	Vida Útil	Características Físicas			Neumáticos			Fuerzas - Aerodinámica			Fuerzas - Resistencia a la Rodadura			Potencia					
	Método de Carro de Pasajero (0-Constante, 1-Óptima)	Equivalente de Pasajero (#)	Número de Ruedas (#)	Número de Neumático (0-Radial, 1-Con cámara)	Número Básico de Reencauches (#)	Costo de Reencauche (%)	Área Frontal (m ²)	Coefficiente de Arrastre Aerodinámico (#)	Multiplicador de Arrastre Aerodinámico (#)	CR_B_A0 (#)	CR_B_A1 (#)	CR_B_A2 (#)	Potencia de Avance (kW)	No Utilizado	Potencia de Frenado (kW)	No Utilizado	Potencia Nominal del Motor (kW)	No Utilizado	VGT_OPER No Utilizado
Motocicleta	1	0,50	2,00	1,00	0,00	100,00	0,80	0,70	1,10	37,00	0,064	0,012	12,00	1	5,00	1	15,00	1	1
Taxi	0	1,00	4,00	0,00	0,00	100,00	1,80	0,40	1,10	37,00	0,064	0,012	25,00	1	20,00	1	60,00	1	1
Liviano particular	0	1,00	4,00	0,00	0,00	100,00	1,90	0,42	1,10	37,00	0,064	0,012	33,00	1	20,00	1	70,00	1	1
Utilitario	1	1,00	4,00	0,00	0,00	100,00	2,80	0,50	1,11	37,00	0,064	0,012	45,00	1	25,00	1	60,00	1	1
Bus Liviano	1	1,20	4,00	0,00	2,00	55,00	4,00	0,50	1,13	37,00	0,064	0,012	50,00	1	45,00	1	75,00	1	1
Bus Mediano	1	1,50	6,00	0,00	3,00	35,00	5,00	0,55	1,14	37,00	0,064	0,012	65,00	1	70,00	1	100,00	1	1
Bus Grande	1	1,60	6,00	0,00	3,00	43,00	6,50	0,65	1,14	37,00	0,064	0,012	120,00	1	120,00	1	130,00	1	1
Camión Liviano	1	1,10	4,00	1,00	2,00	55,00	4,00	0,55	1,13	37,00	0,064	0,012	50,00	1	45,00	1	75,00	1	1
Camión Mediano	1	1,30	6,00	0,00	2,00	35,00	5,00	0,60	1,13	37,00	0,064	0,012	87,00	1	70,00	1	100,00	1	1
Camión Pesado	1	1,40	10,00	0,00	3,00	43,00	8,50	0,70	1,14	37,00	0,064	0,012	227,00	1	255,00	1	280,00	1	1
Camión Articulado	1	1,60	18,00	0,00	3,00	35,00	9,00	0,80	1,22	37,00	0,064	0,012	227,00	1	255,00	1	300,00	1	1

Fuente: Herramienta RUC.

Los parámetros solicitados para realizar cálculos son los siguientes:

- Vida Útil
- Características Físicas
- Neumáticos (tipo de neumático, número de reencaches, etc.)
- Fuerzas – Aerodinámicas
- Fuerzas – Resistencia a la Rodadura
- Potencia
- Velocidad – Parámetros de Velocidad Deseada (VCURVE, VROUGH, etc.)
- Velocidad – Parámetros (velocidad máxima rectificada, sigma de velocidad, etc.)
- Combustible (velocidad del motor, eficiencia de combustible, etc.)
- Lubricantes

- Fuerzas – Ruido en la Aceleración
- Neumáticos (diámetro de llantas, constante térmica, etc.)
- Mantenimiento – Repuestos
- Mantenimiento – Trabajo
- Vida Útil Óptima (coef. de regresión 1 y 2)
- Valor Residual
- Seguridad Vial

3. Características de la vía

Solicita información sobre las características básicas de la vía a ser evaluada. Los parámetros requeridos están agrupados de la siguiente forma:

- a. Condición de la Vía
 - Rugosidad de la Vía (IRI, m/km)
 - Ancho de la Vía (m)
 - Superficie
- b. Geometría de la Vía
 - Subidas y Bajadas (m/km)
 - Número de Subidas y Bajadas (#)
 - Arqueamiento Horizontal (grados/km)
 - Superelevación (%)
 - Altitud (m)
- c. Factores de Ajuste de Velocidad
 - Velocidad Límite (km/hora)
 - Factor de cumplimiento de velocidad límite (#)
 - Fricción de la Vía (#)
 - Fricción del Tránsito No Motorizado (#)
- d. Factores de Resistencia a la Rodadura
 - Porcentaje del tiempo que se conduce sobre Agua (%)
 - Porcentaje del tiempo que se conduce sobre Nieve (%)
 - Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)
- e. Tránsito Vial
 - Descripción del vehículo (motocicleta, automóvil pequeño, etc.)
 - Promedio Anual de Tránsito Diario
- f. Índice de Accidentes en la Flota Vehicular
 - Número de accidentes fatales por cada 100 millones de vehículos-km (#)
 - Número de daños serios por cada 100 millones de vehículos-km (#)
- g. Patrón de Flujo de Tránsito
 - Porcentaje de Tránsito Anual en cada período (Período 1 a 5)
 - Número de Horas por cada año en cada período (Período 1 a 5)
- h. Tipo de Velocidad de Tráfico
 - Capacidad Máxima (pcse/hora/carril)
 - Capacidad de Flujo Libre (pcse/hora/carril)
 - Capacidad Nominal (pcse/hora/carril)
 - Velocidad de embotellamiento a máxima capacidad (km/hora)
 - Número de carriles (#)
- i. Factor de Ajuste de Velocidad Deseada
- j. Parámetros de Ruido de la Aceleración
 - z_{adral} (m/s^2)
 - z_{amaxr} (m/s^2)
- k. Factor de Ajuste de Velocidad de Operación
- l. Efectos de la Aceleración

En este punto, se muestran los valores por defecto manejados por el modelo HDM-4 de acuerdo con las características de la vía.

Figura 4.5 Característica de la vía

Características de la Vía

Condición de la calzada			Geometría de la calzada				
Rugosidad de la Vía (IRI, m/km)	Ancho de la Vía (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Gravel/ 4 - Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)
3,5	10,2	1	1	1	10	2,0	2810

Factores de Ajuste de Velocidad				Factores de Resistencia a la Rodadura		
Velocidad Límite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavmentadas (mm)
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70

Tránsito Vial	
Descripción de Vehículo	Tránsito promedio Diario Anual TPDA
Motocicleta	667
Taxi	3979
Livano particular	35
Utilitario	37
Bus Livano	95
Bus Mediano	158
Bus Grande	387
Camión Liviano	53
Camión Mediano	50
Camión Pesado	12
Camión Articulado	21
Bus Articulado	0
Total	5494

Índice de Accidentes en Flota Vehicular		
Número por cada 100 millones de vehículos-km	Accidente Fatal	Daños Serios
	3	30

Patrón de Flujo de Tránsito									
Porcentaje de Tránsito Anual en Cada Período					Número de Horas Por Año en Cada Período				
Período 1 (%)	Período 2 (%)	Período 3 (%)	Período 4 (%)	Período 5 (%)	Período 1 (#)	Período 2 (#)	Período 3 (#)	Período 4 (#)	Período 5 (#)
20,21	20,21	22,34	26,60	10,64	1770,6	1770,6	1957,0	2329,8	931,9
100					8760				

Tipo de Flujo - Velocidad					Factor de Ajuste de Velocidad Deseado (#)	Parámetros de Ruido de la Aceleración		Factor de Ajuste de Velocidad de Operación (#)	Efectos de Aceleración (1-SI, 0-No)
Capacidad Máxima (pcse/hora/carril)	Capacidad a Flujo Libre (pcse/hora/carril)	Capacidad Nominal (pcse/hora/carril)	Velocidad de embotellamiento a máxima Capacidad (km/hora)	Número de Carriles (#)		zadral (m/s2)	zamaxr (m/s2)		
1440	159	979	6,83	2	1	0,10	0,65	1,0	0

Fuente: Herramienta RUC.

4. Parámetros de sensibilidad

Define los parámetros de entrada necesarios para ejecutar el análisis de sensibilidad el modelo. La herramienta calcula sensibilidad para los siguientes parámetros:

- Sensibilidad en la Rugosidad
- Sensibilidad en la Velocidad Límite
- Sensibilidad en el Tránsito

5. Características de la red vial

Almacena las características de la red vial a ser evaluada. Cada fila representa un tramo vial homogéneo de la red. En este punto se debe ingresar todos los atributos de los tramos en las columnas correspondientes.

Debido a que se realizaron evaluaciones individuales de diferentes tramos y al no estar conectados los mismos corredores, la red vial a ser evaluada no se tiene en cuenta dentro de este análisis. Sin embargo, dentro de la herramienta RUC-Boyacá, se toma por defecto la información de HDM-4 ya que no produce modificación a los análisis.

6. Datos de análisis costo beneficio

Esta hoja almacena los datos necesarios para ejecutar un análisis básico de costo beneficio considerando un período de evaluación de 20 años. Se ingresa: 1) el tránsito normal por tipo de vehículo durante el período de evaluación; 2) las características

anuales de la alternativa sin proyecto y la alternativa con proyecto, que consisten en el capital anual estimado y costos de mantenimiento en la vía, en \$ millones por año, y el estimado correspondiente a las características anuales de la vía (condición, geometría, factores de reducción de velocidad, etc.).

Figura 4.6 Parámetros de sensibilidad

Sensibilidad en la Rugosidad	
Rugosidad Mínima (IRI, m/km)	2
Rugosidad Máxima (IRI, m/km)	20

Sensibilidad en el Límite de Velocidad	
Límite de Velocidad Mínima (km/hora)	20
Límite de Velocidad Máxima (km/hora)	110

Sensibilidad en el Tránsito									
Tránsito promedio diario anual y Composición del tránsito para cada una de las categorías									
Categorías de tránsito	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Tránsito promedio diario anual (TPDA)	5	20	65	200	650	2.000	6.500	20.000	65.000
Vehículo	Composición Típica de Tránsito (%)								
Motocicleta	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Taxi	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
Liviano particular	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
Utilitario	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Bus Liviano	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Bus Mediano	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Bus Grande	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Camión Liviano	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Camión Mediano	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Camión Pesado	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Camión Articulado	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.7 Características de la red vial

Características de la Red

ID de calzada	Descripción de calzada	Longitud de tramo (km)	Condición de la calzada			Tránsito promedio diario anual										Geometría de la Vía						
			Rugosidad (IRI, m/km)	Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto/ 3- Gravel/ 4- Tierra)	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)
RD1	Vía 1	100,0	2,0	7,0	1	10	40	40	20	20	10	20	20	10	2	6	2	1	1	3	2,0	0
RD2	Vía 2	100,0	4,0	7,0	2	10	40	40	20	20	10	20	20	10	2	6	2	1	1	3	2,0	0
RD3	Vía 3	100,0	6,0	7,0	3	10	40	40	20	20	10	20	20	10	2	6	2	1	1	3	2,0	0
RD4	Vía 4	100,0	6,0	7,0	4	10	40	40	20	20	10	20	20	10	2	6	2	1	1	3	2,0	0
RD5	Vía 5	100,0	10,0	7,0	1	10	40	40	20	20	10	20	20	10	2	6	2	1	1	3	2,0	0
RD6	Vía 6	100,0	12,0	7,0	1	10	40	40	20	20	10	20	20	10	2	6	2	1	1	3	2,0	0

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.8 Datos de análisis costo beneficio

Datos de Análisis Costo Beneficio

Tránsito Normal

Año	Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)											Total
	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	
1	0	0	750	300	0	135	120	75	15	30	45	0
2	0	0	773	309	0	139	124	77	15	31	46	0
3	0	0	796	318	0	143	127	80	16	32	48	0
4	0	0	820	328	0	148	131	82	16	33	49	0
5	0	0	844	338	0	152	135	84	17	34	51	0
6	0	0	869	348	0	157	139	87	17	35	52	0
7	0	0	896	358	0	161	143	90	18	36	54	0
8	0	0	922	369	0	166	148	92	18	37	55	0
9	0	0	950	380	0	171	152	95	19	38	57	0
10	0	0	979	391	0	176	157	98	20	39	59	0
11	0	0	1008	403	0	181	161	101	20	40	60	0
12	0	0	1038	415	0	187	166	104	21	42	62	0
13	0	0	1069	428	0	192	171	107	21	43	64	0
14	0	0	1101	441	0	198	176	110	22	44	66	0
15	0	0	1134	454	0	204	182	113	23	45	68	0
16	0	0	1168	467	0	210	187	117	23	47	70	0
17	0	0	1204	481	0	217	193	120	24	48	72	0
18	0	0	1240	496	0	223	198	124	25	50	74	0
19	0	0	1277	511	0	230	204	128	26	51	77	0
20	0	0	1315	526	0	237	210	132	26	53	79	0

Fuente: Herramienta RUC.

4.1.2.2. Resultados del modelo. Luego de evaluadas las opciones del modelo y posterior a la definición de los parámetros de entrada que permiten establecer las condiciones básicas de la región a evaluar, la herramienta de Excel, así como el software HDM-4 generan una serie de informes y gráficos como resultado del procesamiento de los cálculos internos del programa, los cuales se relacionan a continuación:

1. Costos de usuarios

Esta hoja almacena los costos unitarios de usuario y velocidades resultantes. La hoja presenta para cada tipo de vehículo y para el promedio de la flota vehicular.

Figura 4.9 Costos unitarios de usuario

Características de la Vía

Rugosidad de la calzada (IRI, m/km)	Condición de la calzada			Geometría de la calzada				
	Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Grava/ 4- Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)	
3.5	10.2	1	1	1	10	2.0	2810	

Velocidad Límite (km/hora)	Factores de Ajuste de Velocidad			Factores de Resistencia a la Rodadura			Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)	Tránsito Diario
	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite	Fricción de la Vía	Fricción del Tránsito No Motorizado	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Tránsito Diario		
50	1.00	0.80	1.00	49	0	0.70	5494	

Costos Unitarios de Usuario para Rugosidad con IRI Igual a 3,5 m/km

	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Flota Vehicular
Costos de Usuario (\$/vehículo-km)	468,190	594,478	720,215	1153,645	1595,160	2397,529	4446,633	7798,195	2666,802	3423,005	4766,665	0,000	376,566
Costo de Operación Vehicular (\$/vehículo-km)	144,926	399,241	514,230	904,155	1201,604	1602,612	3166,206	1540,265	2406,514	3126,361	4443,817	0,000	666,576
Combustible (\$/vehículo-km)	59,070	89,206	101,531	106,430	116,535	124,624	252,816	127,683	136,148	290,822	339,782	0,000	100,954
Lubricantes (\$/vehículo-km)	0,650	2,744	3,115	3,210	2,052	2,193	4,434	2,243	2,390	5,103	5,261	0,000	2,593
Neumáticos (\$/vehículo-km)	0,377	1,626	1,941	6,086	6,690	8,221	26,090	14,003	25,070	24,303	101,646	0,000	4,417
Piezas de Mantenimiento (\$/vehículo-km)	10,987	211,146	157,467	188,678	401,516	527,618	1375,470	685,300	1383,560	1350,994	2056,147	0,000	306,543
Trabajo de Mantenimiento (\$/vehículo-km)	14,722	54,660	44,593	37,699	162,584	274,678	269,138	219,489	226,196	276,121	326,493	0,000	77,600
Tiempo de Operador (\$/vehículo-km)	0,000	0,000	0,000	0,000	284,322	312,692	328,656	325,068	319,698	341,476	382,199	0,000	45,312
Depreciación (\$/vehículo-km)	52,649	31,928	163,954	487,388	162,266	260,397	704,429	100,518	204,775	565,863	814,489	0,000	100,939
Interés (\$/vehículo-km)	6,471	7,731	41,627	74,664	38,021	61,324	173,122	41,012	63,260	213,526	351,015	0,000	24,730
Gasto General (\$/vehículo-km)	0,000	0,000	0,000	0,000	27,628	30,865	32,050	24,948	28,427	56,653	67,784	0,000	4,487
Costos de Tiempo (\$/vehículo-km)	42,757	37,862	47,028	47,557	244,667	643,027	1081,191	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	132,115
Tiempo de Pasajero (\$/vehículo-km)	42,757	37,862	47,028	47,557	244,667	643,027	1081,192	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	132,115
Tiempo de Acarreo de Carga (\$/vehículo-km)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Costo de Emisiones (\$/vehículo-km)	24,935	9,441	11,023	11,832	42,222	46,222	93,769	66,729	70,067	149,710	174,914	0,000	20,959
Costo de Seguridad Vial (\$/vehículo-km)	253,602	147,634	147,934	190,201	105,667	105,667	105,667	190,201	190,201	147,934	147,934	0,000	156,916
Costo de Usuario (%)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%	100,0%
Costo de Operación Vehicular (%)	31,1%	67,2%	71,4%	78,4%	75,3%	66,8%	71,2%	85,8%	90,2%	91,3%	93,2%	0,0%	68,3%
Costo de Tiempo (%)	9,2%	6,4%	6,5%	4,1%	15,3%	26,8%	24,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13,5%
Costo de Emisiones (%)	5,3%	1,6%	1,5%	1,0%	2,7%	1,9%	2,1%	3,7%	2,6%	4,4%	3,7%	0,0%	2,1%
Costo de Seguridad Vial (%)	54,4%	24,9%	20,5%	16,5%	6,6%	4,4%	2,4%	10,6%	7,1%	4,3%	3,1%	0,0%	16,1%
Velocidad del Vehículo (km/hr)	39,8	39,8	39,8	39,4	38,5	38,5	36,6	38,5	39,1	36,6	32,7	25,0	99,8
Tráfico Diario (vehículos/día)	667	3979	35	37	95	158	387	53	50	12	21	0	5494

Fuente: Herramienta RUC.

2. Recursos y desempeño

Esta hoja presenta para cada tipo de vehículo los recursos necesitados previstos por 1000 vehículos-km (combustible, lubricantes, neumáticos, tiempo, etc.) y el desempeño de los vehículos en términos de consumo de combustible, lubricantes y neumáticos.

3. Emisiones

Esta hoja presenta para cada tipo de vehículo las emisiones previstas en gramos por kilómetro para siete tipos de emisiones (dióxido de carbono, monóxido de carbono, partículas, plomo, etc.) y detalles del consumo de combustible y velocidad previstos.

4. Sensibilidad en la rugosidad

Esta hoja presenta una tabla de sensibilidad en la rugosidad de costos de usuario y los coeficientes de los polinomios de tercer grado relacionando la rugosidad a los costos.

5. Coeficientes RNET

Esta hoja presenta los coeficientes de los polinomios de tercer grado relacionando la rugosidad a los costos de usuario de la flota vehicular, para los diferentes niveles de tránsito.

6. Sensibilidad en la velocidad límite

Esta hoja presenta una tabla de sensibilidad en la velocidad límite de costos de usuario y los coeficientes de los polinomios de tercer grado relacionando la velocidad límite a los costos.

7. Sensibilidad en el tránsito

Esta hoja presenta una tabla de sensibilidad en el tránsito diario de costos de usuario y los coeficientes de los polinomios de tercer grado relacionando el tráfico diario a los costos.

Figura 4.10 Recursos y desempeño por 1000 vehículos-km

Datos de País

Nombre de País	Moneda	Año
Boyacá	\$	2018

Características de la Vía

Condición de la calzada				Geometría de la calzada					Altitud (m)
Rugosidad de la calzada (IRI, m/km)	Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Astfalto/ 2- Concreto 3- Gravel/ 4 - Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peraite (%)			
3,5	10,2	1	1	1	10	2,0		2810	

Factores de Ajuste de Velocidad				Factores de Resistencia a la Rodadura			Tránsito Diario
Velocidad Límite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)	
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70	5494

Recursos por 1000 vehículos-km para Rugosidad con IRI de 3,5 m/km

	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado
Costos de Operación Vehicular												
Combustible (litros)	40,87	61,72	70,25	73,64	70,38	75,26	152,68	77,11	82,22	175,64	205,20	205,20
Lubricantes (litros)	0,06	0,18	0,20	0,21	0,15	0,16	0,32	0,16	0,17	0,37	0,43	0,43
Neumáticos (% de costo de neumático nuevo)	0,25%	0,46%	0,45%	0,42%	0,38%	0,23%	0,38%	1,06%	0,49%	0,22%	0,42%	0,42%
Piezas de Mantenimiento (% de costo de vehículo nuevo)	0,26%	0,71%	0,45%	0,30%	0,42%	0,34%	0,32%	0,66%	0,70%	0,52%	0,54%	0,54%
Trabajo de Mantenimiento (horas)	3,98	6,15	5,02	4,24	15,05	16,48	16,15	18,92	19,41	20,76	21,13	21,13
Tiempo de Operador (horas)					26,00	25,99	27,32	26,01	25,58	27,32	30,58	30,58
Depreciación (% de costo de vehículo nuevo)	1,29%	0,11%	0,48%	0,81%	0,17%	0,17%	0,17%	0,10%	0,11%	0,23%	0,23%	0,23%
Interés (% de costo de vehículo nuevo)	0,15%	0,03%	0,12%	0,12%	0,04%	0,04%	0,04%	0,04%	0,04%	0,08%	0,09%	0,09%
Costos de Tiempo												
Tiempo de Pasajero (horas/pasajero)	25,1	25,1	25,1	25,4	26,0	26,0	27,3	26,0	25,6	27,3	30,6	30,6
Tiempo de Acarreo de Carga (horas/vehículo)	25,1	25,1	25,1	25,4	26,0	26,0	27,3	26,0	25,6	27,3	30,6	30,6

Desempeño para Rugosidad con IRI de 3,5 m/km

	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado
Consumo de Combustible (km/litro)	24,47	16,20	14,23	13,58	14,21	13,29	6,55	12,97	12,16	5,69	4,87	4,87
Consumo de Lubricantes (km/litro)	17,355	5,655	4,982	4,834	6,687	6,258	3,095	6,117	5,740	2,689	2,304	2,304
Vida de Neumático (km)	396,691	219,076	223,176	237,983	261,143	441,607	264,157	94,551	202,324	463,115	237,041	237,041

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.11 Emisiones

Datos de País

Nombre de País	Moneda	Año
Boyacá	\$	2018

Características de la Vía

Condición de la calzada				Geometría de la calzada					Altitud (m)
Rugosidad de la calzada (IRI, m/km)	Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Astfalto/ 2- Concreto 3- Gravel/ 4 - Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peraite (%)			
3,5	10,2	1	1	1	10	2,0		2810	

Factores de Ajuste de Velocidad				Factores de Resistencia a la Rodadura			Tránsito Diario
Velocidad Límite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)	
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70	5494

Emisiones para Rugosidad con IRI de 3,5 m/km

	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado
Velocidad del Vehículo (km/hr)	39,8	39,8	39,8	39,4	38,5	38,5	36,6	38,5	39,1	36,6	32,7	25,0
Velocidad del Vehículo (m/s)	11,0	11,1	11,1	10,9	10,7	10,7	10,2	10,7	10,9	10,2	9,1	6,9
Vida Útil del Vehículo (años)	8	10	10	10	20	20	20	35	35	35	35	20
Consumo de Combustible (km/litro)	24,47	16,20	14,23	13,58	14,21	13,29	6,55	12,97	12,16	5,69	4,87	0,00
Consumo de Combustible (millas/galón)	57,55	38,11	33,48	31,94	33,42	31,25	15,40	30,50	28,60	13,39	11,46	0,00
Consumo de Combustible (litro/100km)	4,09	6,17	7,03	7,36	7,04	7,53	15,27	7,71	8,22	17,56	20,52	0,00
Consumo de Combustible (mL/s)	0,45	0,68	0,78	0,81	0,75	0,80	1,55	0,82	0,89	1,79	1,86	0,00
Dióxido de Carbono - CO2 (g/km)	81,719	146,965	167,216	175,265	183,627	196,373	398,368	197,622	210,724	450,121	525,900	0,000
Monóxido de Carbono - CO (g/km)	6,131	0,180	0,232	0,251	0,949	1,015	2,059	1,422	1,516	3,238	3,784	0,000
Hidrocarburos - HC (g/km)	1,839	0,027	0,035	0,038	1,211	1,295	2,626	2,122	2,263	4,834	5,647	0,000
Óxido de Nitrógeno - Nox (g/km)	0,613	0,671	0,810	0,862	3,322	4,194	8,509	6,513	6,945	14,835	17,332	0,000
Partículas - Par (g/km)	0,003	0,007	0,008	0,008	0,190	0,203	0,412	0,284	0,303	0,648	0,757	0,000
Dióxido de Sulfuro - SO2 (g/km)	0,031	0,046	0,053	0,055	0,605	0,647	1,313	0,663	0,707	1,510	1,765	0,000
Plomo - Pb (g/km)	0,012	0,019	0,021	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Costo de Emisiones (\$/tonelada-km)	24,905	9,441	11,023	11,632	43,222	46,222	93,768	65,729	70,087	149,710	174,914	0,000

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.12 Sensibilidad en la rugosidad

Datos de País

Nombre de País	Moneda	Año
Boyacá	\$	2018

Características de la Vía

Condición de la calzada				Geometría de la calzada			
Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Gravel/ 4- Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)	
10,2	1	1	1	10	2,0	2810	

Factores de Ajuste de Velocidad				Factores de Resistencia a la Rodadura			
Velocidad Límite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)	Tránsito Diario
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70	5494

Sensibilidad de Costos Unitarios de Usuario debido a la Rugosidad (\$/vehículo-km)

Rugosidad (IRI, m/km)	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Promedio Flota Vehicular
2,0	408,447	435,851	571,570	756,794	1129,954	1580,673	2660,264	1146,761	1638,643	2142,173	2917,995	0,000	668,183
4,0	412,377	449,816	582,452	775,280	1163,129	1642,566	2787,465	1208,737	1739,916	2245,378	3065,656	0,000	692,591
6,0	420,526	475,696	603,793	833,336	1225,323	1758,754	3036,169	1317,014	1916,893	2445,722	3349,610	0,000	738,965
8,0	430,685	501,677	626,917	909,225	1288,802	1872,607	3277,488	1414,225	2073,627	2641,717	3628,028	0,000	784,901
10,0	440,666	527,488	650,694	983,070	1359,742	1995,953	3533,897	1512,564	2229,954	2838,828	3915,250	0,000	832,190
12,0	450,423	553,445	676,235	1062,559	1443,395	2139,463	3853,455	1618,592	2395,199	3053,599	4235,027	0,000	885,105
14,0	460,690	580,387	704,734	1120,068	1541,399	2306,383	4240,017	1734,610	2573,120	3294,940	4585,147	0,000	944,829
16,0	471,947	609,017	736,433	1186,676	1651,480	2492,741	4657,303	1859,612	2763,174	3554,149	4950,670	0,000	1009,163
18,0	484,114	639,291	770,629	1253,000	1769,946	2692,262	5096,087	1991,899	2962,243	3822,139	5323,231	0,000	1076,292
20,0	495,721	670,121	803,025	1307,309	1890,050	2893,988	5501,527	2126,325	3162,630	4081,683	5680,895	0,000	1142,799

Coefficientes de Polinomio Cúbico de Costos Unitarios de Usuario debido a la Sensibilidad por Rugosidad

Costos Unitarios de Usuario (\$/vehículo-km) = a0 + a1 * IRI + a2 * IRI² + a3 * IRI³

Coefficiente	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Promedio Flota Vehicular
a0	403,09161	415,96422	559,04409	729,85814	1100,16697	1517,00269	2562,35490	#####	1500,75286	2017,22409	2757,30481	0,00000	640,69689
a1	1,79713	8,19428	4,59307	4,19384	10,93803	25,08869	33,74549	36,02422	61,20501	49,46768	60,44150	0,00000	10,74166
a2	0,23126	0,33604	0,51439	2,83298	1,58904	2,38824	7,29020	0,86426	1,18717	3,78009	6,77414	0,00000	0,95678
a3	-0,00451	-0,00561	-0,00667	-0,08038	-0,00780	-0,00960	-0,07968	-0,00060	-0,00467	-0,05433	-0,12406	0,00000	-0,01186

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.13 Coeficientes RONET

Datos de País

Nombre de País	Moneda	Año
Boyacá	\$	2018

Características de la Vía

Condición de la calzada				Geometría de la calzada			
Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Gravel/ 4- Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)	
10,2	1	1	1	10	2,0	2810	

Factores de Ajuste de Velocidad				Factores de Resistencia a la Rodadura			
Velocidad Límite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)	Tránsito Diario
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70	5494

Promedio de Costos Unitarios de Usuario de la Flota Vehicular debido a la Sensibilidad por Rugosidad Coeficientes de Polinomio de Tercer Grado para Diferentes Niveles de Tráfico

Promedio de Costos de Usuario de la Flota Vehicular (\$/vehículo-km) = a0 + a1 * IRI + a2 * IRI² + a3 * IRI³

Nivel de Tránsito	Categoría de Nivel de Tránsito y Tránsito Diario por Nivel de Tráfico								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Tránsito diario (TPDA)	5	20	65	200	650	2.000	6.500	20.000	65.000
a0	0,9748786	3,8995142	12,6734	38,9951422	126,7342122	389,951	1267,342122	3787,73	43723,63546
a1	0,0227255	0,0909021	0,29543	0,909021115	2,954318625	9,09021	29,54318625	210,631	313,14856
a2	0,0036761	0,0147043	0,04779	0,147042567	0,477888343	1,47043	4,778883426	8,26077	15,59765
a3	-9,64E-05	-0,000385	-0,00125	-0,003854242	-0,012526287	-0,03854	-0,125262875	-0,21516	-0,49634

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.14 Sensibilidad en la velocidad límite

Datos de País												
Nombre de País	Moneda	Año										
Boyacá	\$	2018										

Características de la Vía												
Rugosidad de la calzada (IRI, m/km)	Condición de la calzada				Geometría de la calzada							
	Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Grava/ 4 - Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)					
3,5	10,2	1	1	1	10	2,0	2810					

Factores de Ajuste de Velocidad					Factores de Resistencia a la Rodadura					
Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del Tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)	Tránsito Diario				
1,00	0,80	1,00	49	0	0,70	5494				

Sensibilidad de Costos Unitarios de Usuario debido a la Velocidad Límite (\$/vehículo-km)												
Velocidad Límite (km/hora)	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Promedio de Flota Vehicular
20,0	525,204	658,555	844,231	1328,024	2206,291	3442,850	5975,372	2206,586	3117,001	4064,957	5391,923	0,000
30,0	485,462	613,519	761,011	1212,421	1809,873	2767,176	4899,133	1937,760	2818,788	3605,197	4899,662	0,000
40,0	470,717	598,463	729,893	1167,826	1693,456	2498,503	4519,842	1833,977	2704,734	3451,431	4781,202	0,000
50,0	466,190	594,478	720,215	1153,545	1595,160	2397,529	4446,833	1796,195	2666,802	3423,005	4766,665	0,000
60,0	464,959	593,515	717,560	1149,561	1574,146	2360,942	4435,951	1782,779	2655,257	3418,814	4764,749	0,000
70,0	464,596	593,245	716,775	1148,375	1566,098	2346,895	4433,961	1777,677	2651,492	3418,049	4764,406	0,000
80,0	464,474	593,156	716,508	1147,973	1562,704	2340,866	4433,573	1775,532	2650,107	3417,894	4764,327	0,000
90,0	464,427	593,121	716,406	1147,818	1561,133	2338,221	4433,573	1774,540	2649,536	3417,894	4764,305	0,000
100,0	464,407	593,107	716,363	1147,752	1560,346	2336,844	4433,573	1774,044	2649,493	3417,894	4764,304	0,000
110,0	464,397	593,100	716,342	1147,721	1560,106	2336,106	4433,573	1773,790	2649,493	3417,894	4764,304	0,000

Sensibilidad de la Velocidad de Operación debido a la Velocidad Límite (km/hora)													
Velocidad Límite (km/hora)	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Promedio de Flota Vehicular
20,0	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	0,0	19,6
30,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	0,0	29,0
40,0	36,3	36,3	36,3	36,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,8	35,1	32,2	0,0	36,1
50,0	39,8	39,8	39,8	39,4	38,5	38,5	38,5	38,5	39,1	36,6	32,7	0,0	39,5
60,0	40,9	41,0	41,0	40,5	39,9	39,9	36,8	39,9	40,3	36,8	32,8	0,0	40,6
70,0	41,3	41,4	41,4	40,8	40,4	40,5	36,9	40,4	40,7	36,9	32,8	0,0	40,9
80,0	41,4	41,5	41,5	40,9	40,7	40,7	36,9	40,7	40,9	36,9	32,8	0,0	41,1
90,0	41,5	41,5	41,5	40,9	40,8	40,8	36,9	40,8	40,9	36,9	32,8	0,0	41,1
100,0	41,5	41,6	41,6	41,0	40,9	40,9	36,9	40,8	40,9	36,9	32,8	0,0	41,1
110,0	41,5	41,6	41,6	41,0	40,9	40,9	36,9	40,9	40,9	36,9	32,8	0,0	41,1

Coeficientes de Polinomio Cúbico de Costos Unitarios de Usuario debido a la Sensibilidad por Velocidad Límite													
Costos Unitarios de Usuario (\$/vehículo-km) = b0 + b1 * Velocidad + b2 * Velocidad^2 + b3 * Velocidad^3													
Coefficiente	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Promedio de Flota Vehicular
b0	621,83743	764,58149	1047,08811	1612,69892	3184,88663	5114,86381	8549,36992	2865,78383	3949,25218	5143,94573	6451,80165	0,000	1549,12645
b1	-6,68628	-7,40008	-14,03111	-19,64195	-67,11891	-114,59451	-179,42788	-45,90322	-50,42190	-75,68345	-75,61946	0,000	-24,83856
b2	0,08990	0,10054	0,18842	0,26299	0,86644	1,51194	2,45561	0,60014	0,67326	1,03852	1,05330	0,000	0,33669
b3	-0,00038	-0,00043	-0,00081	-0,00112	-0,00375	-0,00639	-0,01064	-0,00255	-0,00287	-0,00451	-0,00462	0,000	-0,00145

Fuente: Herramienta RUC.

Figura 4.15 Sensibilidad en el tránsito

Datos de País												
Nombre de País	Moneda	Año										
Boyacá	\$	2018										

Características de la Vía												
Rugosidad de la calzada (IRI, m/km)	Condición de la calzada				Geometría de la calzada							
	Ancho de la calzada (m)	Superficie (1-Asfalto/ 2- Concreto 3- Grava/ 4 - Tierra)	Subidas y Bajadas (m/km)	Número de Subidas y Bajadas por km (#)	Curvatura Horizontal (grados/km)	Peralte (%)	Altitud (m)					
3,5	10,2	1	1	1	10	2,0	2810					

Factores de Ajuste de Velocidad					Factores de Resistencia a la Rodadura						
Velocidad Límite (km/hora)	Factor de cumplimiento de Velocidad Límite (#)	Fricción de la Vía (#)	Fricción del tránsito No Motorizado (#)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Agua (%)	Porcentaje del Tiempo que se conduce sobre Nieve (%)	Profundidad de Textura de Vías Pavimentadas (mm)					
50	1,00	0,80	1,00	49	0	0,70					

Sensibilidad de Costos Unitarios de Usuario debido al Tráfico (\$/vehículo-km)													
Tráfico Diario	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Promedio de Flota Vehicular
5	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
20	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
65	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
200	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
650	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
2.000	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
6.500	473,030	598,468	724,205	1158,675	1598,010	2400,379	4449,683	1801,325	2671,932	3426,995	4770,655	0,000	23648,601
20.000	499,328	624,913	779,362	1241,158	1897,138	2908,993	5292,826	2003,470	2883,175	3791,546	5225,565	0,000	26417,961
65.000	698,114	979,589	1399,409	2094,938	4709,697	7611,927	12610,206	4003,712	5991,747	7307,817	9063,199	0,000	50213,787

Coeficientes de Polinomio Cúbico de Costos Unitarios de Usuario debido a la Sensibilidad por Tráfico													
Costos Unitarios de Usuario (\$/vehículo-km) = c0 + c1 * Tráfico Diario + c2 * Tráfico Diario^2 + c3 * Tráfico Diario^3													
Coefficiente	Motocicleta	Taxi	Liviano Particular	Utilitario	Bus Liviano	Bus Mediano	Bus Grande	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Grande	Camión Articulado	Bus Articulado	Promedio de Flota Vehicular
c0	473,21305	598,84326	724,59496	1159,27466	1600,23255	2404,17375	4450,96953	1802,80725	2673,45732	3429,68564	4774,12433	0,00000	23669,82190
c1	-9,2E-04	-5,9E-04	-1,3E-03	-2,0E-03	-7,6E-03	-1,3E-02	-2,2E-02	-5,0E-03	-6,2E-03	-9,1E-03	-1,2E-02	0,0E+00	-7,2E-02
c2	9,9E-08	9,3E-08	2,1E-07	3,3E-07	1,2E-06	2,1E-06	3,6E-06	8,2E-07	8,4E-07	1,5E-06	1,9E-06	0,0E+00	1,2E-05
c3	-1,6E-13	9,1E-14	-5,0E-13	-1,2E-12	-5,9E-12	-1,1E-11	-2,0E-11	-3,4E-12	-2,9E-12	-6,7E-12	-1,2E-11	0,0E+00	-6,8E-11

Fuente: Herramienta RUC.

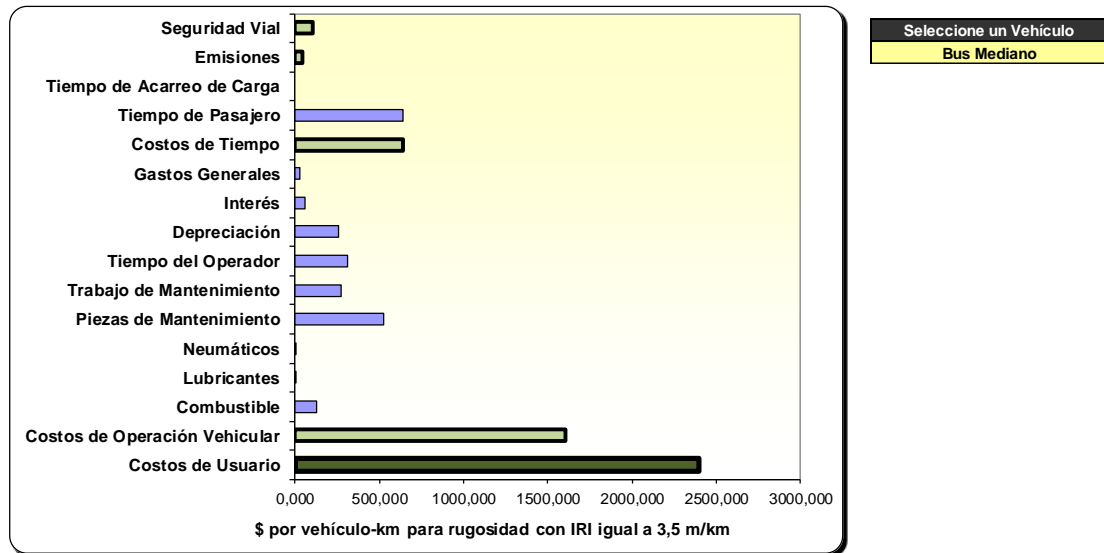
8. Gráficos de un vehículo

Presenta gráficos de los costos de usuario para un vehículo en particular. Los gráficos mostrados son: 1) costos de usuario y componentes, 2) sensibilidad de costos de

usuario en la rugosidad, 3) sensibilidad de costos de usuario en la velocidad límite y 4) sensibilidad de costos de usuario en el tránsito.

Figura 4.16 Gráfico de costos de usuario para un tipo de vehículo

Costos de Usuario para Bus Mediano



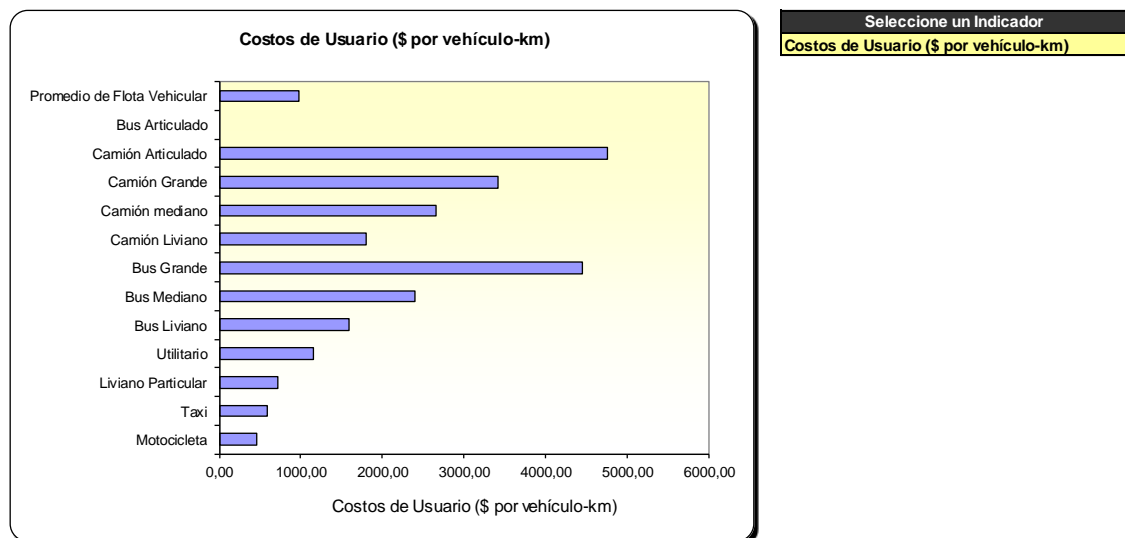
Fuente: Herramienta RUC.

9. Gráficos de todos los vehículos

Los gráficos mostrados son: 1) gráfico de todos los vehículos para el indicador seleccionado, 2) sensibilidad de costos de usuario en la rugosidad para todos los vehículos, 3) sensibilidad de costos de usuario en la velocidad límite para todos los vehículos y 4) sensibilidad de costos de usuario en el tránsito para todos los vehículos.

Figura 4.17 Gráfico de costos de usuario para todos los vehículos

Costos de Usuario (\$ por vehículo-km)



Fuente: Herramienta RUC.

10. Resultados análisis costo beneficio

La hoja presenta los datos anuales para la alternativa sin proyecto y la alternativa con proyecto, que consiste en los costos de intervenciones en la vía, costos totales y emisiones de CO₂. También presenta la comparación de las alternativas de proyecto en términos de Valor Total y Presente, en la tasa de descuento ingresada. Resume los resultados mostrando el Valor Presente Neto del proyecto, la Tasa Interna de Retorno y la disminución en CO₂ total sobre el período de evaluación implementando la alternativa con proyecto.

Figura 4.18 Resultados de análisis costo – beneficio en alternativas de proyecto

Resultados de Análisis Costo Beneficio

Datos Anuales de Alternativa Sin Proyecto

Año	Costos de Intervenciones en la Calzada (M\$)			Costos de Usuario (M\$)	Costos Totales a Sociedad (M\$)	Emisiones de CO ₂ (toneladas)
	Costos de Rehabilitación / Reconstrucción	Costos de Mantenimiento	Costos Totales			
1	0,000	0,024	0,024	7888,827	7888,851	2.219
2	0,000	0,024	0,024	8144,461	8144,485	2.285
3	0,000	0,024	0,024	8422,320	8422,344	2.351
4	0,000	0,024	0,024	8712,491	8712,515	2.418
5	0,000	0,024	0,024	9021,489	9021,513	2.482
6	0,000	0,025	0,025	9359,566	9359,591	2.527
7	0,000	0,025	0,025	9703,674	9703,699	2.551
8	0,000	0,025	0,025	10047,532	10047,557	2.522
9	0,000	0,026	0,026	10409,114	10409,140	2.413
10	0,000	0,026	0,026	10792,261	10792,287	2.204
11	2,240	0,024	2,264	11298,237	11300,501	1.991
12	0,000	0,024	0,024	10885,813	10885,837	3.070
13	0,000	0,024	0,024	11213,861	11213,885	3.163
14	0,000	0,024	0,024	11551,211	11551,235	3.259
15	0,000	0,024	0,024	11898,627	11898,651	3.357
16	0,000	0,024	0,024	12256,601	12256,625	3.458
17	0,000	0,024	0,024	12625,831	12625,855	3.563
18	0,000	0,024	0,024	13006,227	13006,251	3.670
19	0,000	0,024	0,024	13398,738	13398,762	3.780
20	0,000	0,024	0,024	8144,461	8144,485	2.285
Total Valor Presente	2,240	0,486	2,726	208781,342	208784,068	55.569
	0,721	0,204	0,925	80285,950	80286,874	

Datos Anuales de Alternativa Con Proyecto

Año	Costos de Intervenciones en la Calzada (M\$)			Costos de Usuario (M\$)	Costos Totales a Sociedad (M\$)	Emisiones de CO ₂ (toneladas)
	Costos de Rehabilitación / Reconstrucción	Costos de Mantenimiento	Costos Totales			
1	0,000	0,024	0,024	8422,320	8422,344	2.351
2	0,000	0,024	0,024	8712,491	8712,515	2.418
3	0,000	0,024	0,024	9021,489	9021,513	2.482
4	0,000	0,024	0,024	9119,081	9119,105	2.573
5	0,560	0,024	0,584	9393,634	9394,218	2.650
6	0,000	0,024	0,024	9676,751	9676,775	2.730
7	0,000	0,024	0,024	9968,902	9968,926	2.813
8	0,000	0,024	0,024	10271,082	10271,106	2.898
9	0,000	0,024	0,024	10583,860	10583,884	2.985
10	0,000	0,024	0,024	10912,270	10912,294	3.074
11	0,000	0,024	0,024	11261,800	11261,824	3.165
12	0,000	0,024	0,024	11657,993	11658,017	3.257
13	0,000	0,024	0,024	12092,397	12092,421	3.345
14	0,000	0,024	0,024	12529,543	12529,567	3.420
15	0,000	0,025	0,025	12623,253	12623,278	3.562
16	0,560	0,024	0,584	13003,350	13003,934	3.669
17	0,000	0,024	0,024	13395,334	13395,358	3.780
18	0,000	0,024	0,024	13799,890	13799,914	3.894
19	0,000	0,024	0,024	2,896	2,920	3.961
20	0,000	0,024	0,024	2,984	3,008	4.082
Total Valor Presente	1,120	0,481	1,601	196451,320	196452,921	63.107
	0,458	0,201	0,659	81358,006	81358,665	

Fuente: Herramienta RUC.

4.2. CALIBRACIÓN DE SUBMODELOS PARA VÍAS DE BOYACÁ

El modelo de efectos sobre los usuarios de las carreteras RUE definido en el HDM-4, está compuesto por los costos de operación vehicular, los tiempos de viaje, las emisiones de los vehículos, seguridad y energía en conjunto con los efectos del desarrollo. Para el presente estudio, fueron considerados principalmente costos de operación vehicular. Así mismo, a pesar de no encontrarse implícito dentro de la guía de calibración y adaptación del HDM-4, se consideraron algunos valores representativos para los tiempos de viaje. Esto, teniendo en cuenta que son valores requeridos como datos de entrada para el análisis del modelo.

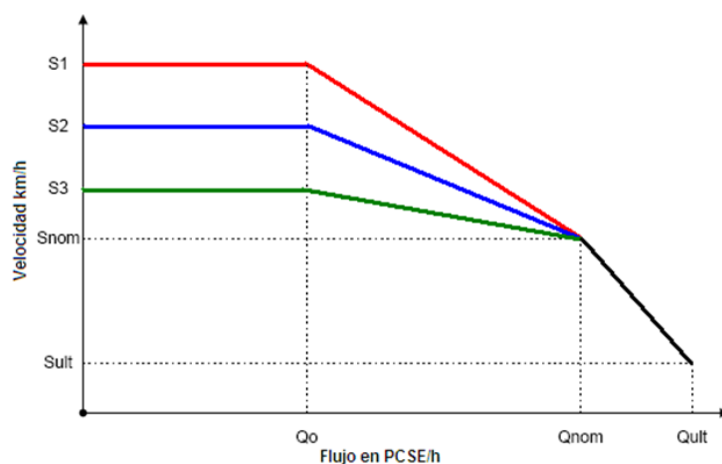
De estudios desarrollados durante el desarrollo y actualización del HDM-4 se ha encontrado que los efectos sobre los usuarios se encuentran influenciados principalmente por la velocidad de los vehículos y la rugosidad de la vía, los cuales a su vez influyen los demás parámetros contenidos en este modelo, como ejemplo, el consumo de combustible es altamente influenciado por la velocidad de los vehículos mientras que la influencia debido a la rugosidad es despreciable.

Teniendo en cuenta los niveles de calibración definidos dentro del alcance de la presente tesis de grado, los modelos a calibrar para adaptarlos a las condiciones locales, especialmente para vías en el Departamento de Boyacá, se centran en los submodelos de velocidad – rugosidad a partir de la calibración de la velocidad a flujo libre restringida por la rugosidad y flujo – velocidad.

Como resultado de la calibración, se pueden definir los parámetros de flujo y velocidad requeridos como dato de entrada para la evaluación de costos de usuarios, según se indicó en el Capítulo 3. A continuación, se hace una breve descripción del modelo flujo-velocidad, el cual es el modelo primario que debe ser calibrado para poder obtener resultados reales y acordes con la realidad de las condiciones locales.

4.2.1. Calibración submodelo flujo – velocidad. El submodelo flujo- velocidad empleado en el HDM-4 corresponde al modelo presentado por Hoban, el cual se encuentra basado en la predicción de la velocidad libre y cinco parámetros adicionales que varían según el tipo de clase. Ver Figura 4.19.

Figura 4.19 Submodelo Flujo Velocidad del HDM-4



Fuente: Contrato de Consultoría No. IDU-BM-112 de 2009

Donde:

- Qult = Capacidad última de la vía
- Qnom = Capacidad nominal donde todos los vehículos viajan a la misma velocidad
- Q0 = flujo en donde la interacción vehicular comienza
- Snom = Velocidad a la capacidad nominal
- Sult = Velocidad a la capacidad última

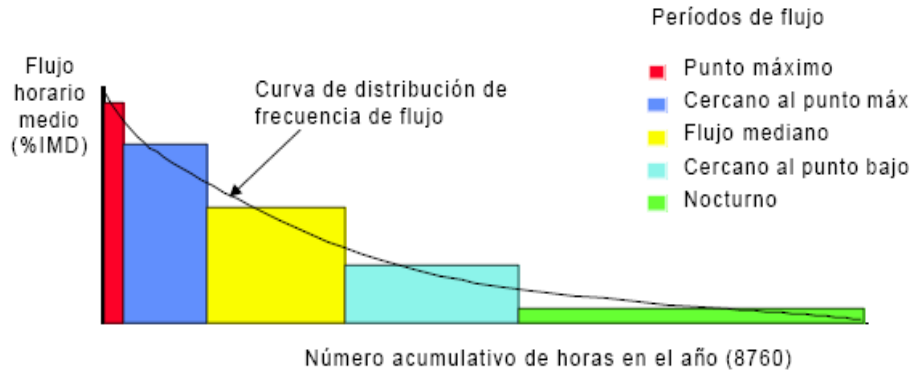
4.2.1.1. Recomendación para la toma de información y definición de períodos. En una vía, especialmente urbana, se presentan diferentes niveles de congestión vehicular a diferentes horas del día y en diferentes días de la semana y del año. Esta variación está dada por la curva de distribución horaria de flujo de tránsito (Ver Figura 4.20) que puede ser la misma para diferentes corredores viales con patrones similares de comportamiento.

Para poder adelantar la calibración es necesario realizar mediciones de tiempos de recorrido en diferentes tipologías de corredores, en cada uno de los cuales se debe medir la velocidad en el sentido de la vía, incluyendo en caso de que aplique, vías sin cruces o vías con intersecciones semaforizadas.

Debido a que a la fecha se cuenta con estudios recientes que contienen información primaria relacionada con la toma de tiempos de recorrido para algunos corredores viales del Departamento de Boyacá, se escogieron 3 corredores de flujo vehicular, siendo representativos aquellos estudios donde estén definidos los periodos de toma de información, así como los horarios de cada toma. A partir de esto, se puede proceder

con la calibración del modelo para determinar los patrones de flujo de tráfico de los corredores en estudio.

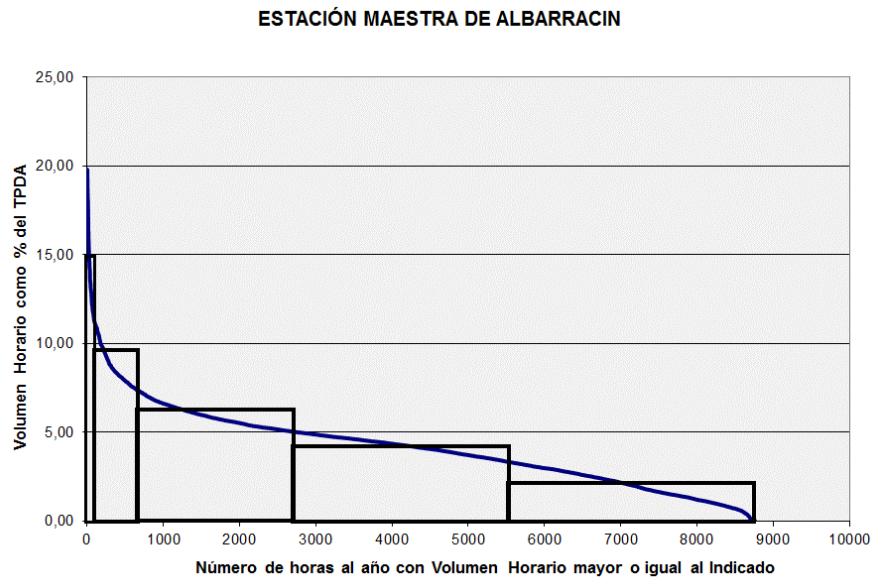
Figura 4.20 Distribución horaria de la frecuencia de flujo – HDM-4



Fuente: Contrato de Consultoría No. IDU-BM-112 de 2009

A continuación, se presentan los resultados de los tres corredores evaluados:

Figura 4.21 Distribución horaria de la frecuencia para la estación Albarracín



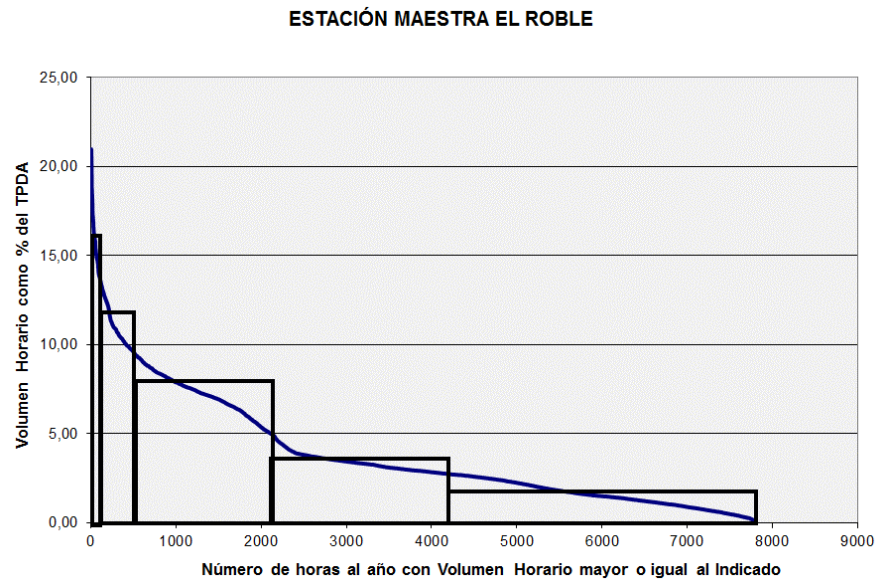
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1 Determinación de periodos para la estación Albarracín

ESTACIÓN MAESTRA ALBARRACÍN				ESTACIÓN MAESTRA ALBARRACÍN (CR)			
Periodo (P)	Horas por año (HRYR _P)	Trafico horario (HV _P)	% del TPDA (PCNADT _P)	Periodo (P)	Horas por año (HRYR _P)	Trafico horario (HV _P)	% del TPDA (PCNADT _P)
1	80	0,152	3,33	1	80	0,152	3,33
2	587	0,097	15,57	2	587	0,097	15,57
3	2063	0,064	35,89	3	2063	0,064	35,89
4	2843	0,043	33,34	4	2843	0,043	33,34
5	3185	0,022	18,76	5	3187	0,019	16,59
Σ	8758	1,069	106,88	Σ	8760	1,047	104,71

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.22 Distribución horaria de la frecuencia para la estación El Roble



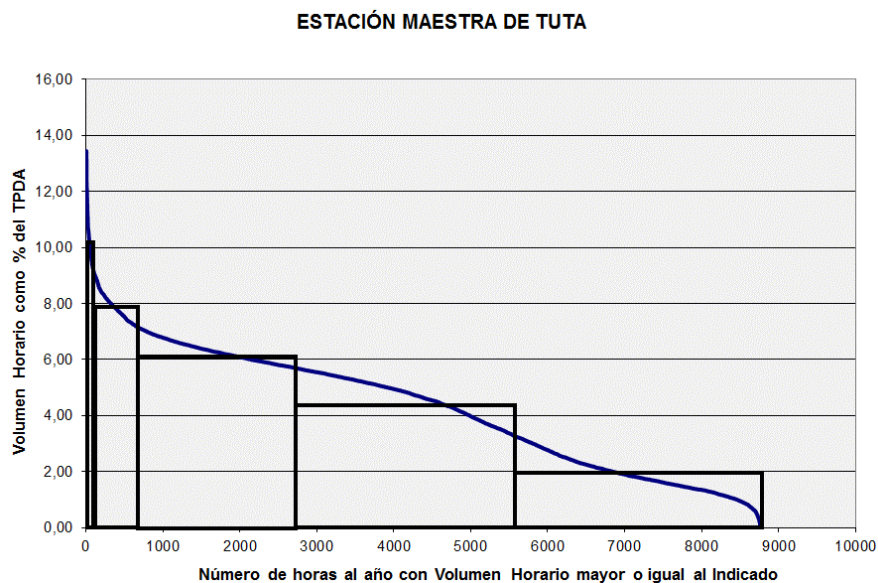
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2 Determinación de periodos para la estación El Roble

ESTACIÓN MAESTRA EL ROBLE				AJUSTE		ESTACIÓN MAESTRA EL ROBLE (CR)			
Periodo (P)	Horas por año (HRYR _p)	Trafico horario (HV _p)	% del TPDA (PCNADT _p)	% HRYR _p	%Δ	Periodo (P)	Horas por año (HRYR _p)	Trafico horario (HV _p)	% del TPDA (PCNADT _p)
1	81	0,161	4,01	1,037	10	1	91	0,161	4,50
2	505	0,120	18,54	6,464	62	2	567	0,120	20,82
3	1594	0,079	38,74	20,405	193	3	1787	0,079	43,43
4	2053	0,036	22,71	26,280	249	4	2302	0,036	25,46
5	3579	0,017	19,13	45,814	434	5	4013	0,017	21,45
Σ	7812	0,920	103,12	Σhoras	8760	Σ	8760	1,031	115,66
				Δhoras	948				

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.23 Distribución horaria de la frecuencia para la estación Tuta



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3 Determinación de periodos para la estación El Roble

ESTACIÓN MAESTRA TUTA			
Periodo (P)	Horas por año (HRYR _P)	Trafico horario (HV _P)	% del TPDA (PCNADT _P)
1	94	0,103	2,64
2	573	0,079	12,43
3	2103	0,062	35,78
4	2825	0,044	33,98
5	3165	0,020	16,91
Σ	8760	1,017	101,74

Fuente: Elaboración propia

4.3. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE USUARIOS DE ACUERDO CON LA ADAPTACIÓN DEL MODELO UTILIZADO

Para llevar a cabo una evaluación económica, se debe calcular el flujo de costos y beneficios de un proyecto; estos beneficios generalmente se expresan como la reducción en los costos de transporte, por lo cual, se considera esencial contar con un mecanismo que permita predecir los costos de transporte bajo diferentes estrategias de inversión.

El costo del transporte generalmente hace referencia a los costos de operación vehicular (COV), los cuales son función de:

- Consumo de combustible
- Consumo de llantas
- Consumo de aceite y lubricantes
- Consumo de partes
- Horas de trabajo
- Depreciación
- Sobrecostos.

Sin embargo, a partir de estudios liderados por el Banco Mundial en países desarrollados como Estados Unidos y en países en desarrollo como Kenia, Brasil y algunas islas del Caribe, se encontró que los costos de los usuarios de la vía estaban ligados no solamente a los costos de operación vehicular sino también a los siguientes costos:

- Costos de tiempo de viaje de vehículos motorizados: tiempos de viaje sin congestión, demoras debido a la congestión, demoras debido a las obras viales
- Costos de tiempo de vehículos no motorizados: tiempos de viaje, costos de operación, impacto sobre el tránsito motorizado
- Costo de accidentes: muertes, heridos graves, pequeños daños.
- Impacto ambiental: emisiones vehiculares, ruido y uso de energía.

Se encontró que estos componentes de los efectos sobre los usuarios se encuentran relacionados con los modelos de flujo-velocidad, consumo de combustible, consumo de llantas entre otros; con esta información se desarrollaron las ecuaciones que relacionan estos modelos, obteniéndose la herramienta RUC desarrollada por el Banco Mundial.

Cabe anotar que esta herramienta no cuenta con un modelo de mantenimiento, partes y mano de obra desarrollado debido a la escasa investigación que se ha hecho en esas áreas.

El modelo de costos sobre usuarios de la vía ha sido analizado y se encontró el impacto de cada uno de los componentes sobre los costos, el cual se presenta en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4 Impacto de los componentes de los costos de usuarios

Componente de los efectos de los usuarios en la vía		Impacto de Costo		
		Alto	Medio	Bajo
Costos de Operación Vehicular	Combustible	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Aceite			<input checked="" type="checkbox"/>
	Llantas			<input checked="" type="checkbox"/>
	Mantenimiento y Reparación		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Depreciación e intereses		<input checked="" type="checkbox"/>	
Costo de demoras	Demoras en las obras		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Demoras debido a la congestión	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Demoras en las intersecciones		<input checked="" type="checkbox"/>	
Accidentalidad	Costos directos			<input checked="" type="checkbox"/>
	Costos Indirectos		<input checked="" type="checkbox"/>	

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la calibración, se obtienen los costos de usuarios para cada uno de los 3 corredores, expresados en costos financieros y costos económicos. Esta información se presenta en el Anexo 7.

4.4. DESARROLLO DEL MODELO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

Como resultado de la calibración del modelo de efectos sobre los usuarios de las vías, generalmente, se deberá desarrollar, diseñar e implementar un modelo de evaluación económica para la ciudad o región donde se aplique esta evaluación, con el fin de permitir decidir a qué infraestructuras se les da prioridad, si se invierte en nueva construcción o en mantenimiento, en qué zonas y en qué momento del tiempo, son elecciones vitales para el futuro de cada zona donde se aplique.

La metodología simplificada para evaluar proyectos relacionados, especialmente, con el mantenimiento vial, está orientada a la formulación de un conjunto de operaciones que tienen como objetivo conservar por un período de tiempo el buen estado de una vía por medio de un sistema de gestión de pavimentos.

4.4.1. Costos y beneficios. El análisis costo – beneficio realiza una comparación sistemática entre todos los costos inherentes a determinado curso de acción y el valor de los bienes, servicios o actividades emergentes de tal acción.

En este contexto los costos – beneficios debidos al mejoramiento de las vías se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Beneficios y costos expresados en términos monetarios (costos de operación vehicular, ahorros en los tiempos de viajes, costos de accidentes, etc.).
- Beneficios cuantificables y costos en términos no monetarios (seguridad en la vía, contaminación de las emisiones de los vehículos, ruido del tráfico, etc.).

- Beneficios y costos no cuantificables (mayor bienestar social, impactos ecológicos, etc.)

De acuerdo con esta clasificación, los costos y beneficios que se deben considerar dentro de la evaluación económica son: costos en que incurre la administración vial, costos de usuarios, efectos ambientales y otros costos y beneficios.

4.4.1.1. Costos en que incurre la administración vial. Involucran todos los costos relacionados con la construcción y mantenimiento de las vías para que se conserven en buen estado. Estos costos incluyen lo siguiente:

- Desarrollo de la vía.
- Conservación de la vía.
- Actividades fuera de la calzada.

El costo de los trabajos se obtiene del producto de las cantidades físicas involucradas en una actividad por su costo unitario. Este se determina para cada tramo y alternativa de inversión en cada año del período de análisis. Los costos resultantes se asignan a las categorías del presupuesto que define el usuario. Las categorías mínimas que se deben definir son:

- Periódica
- Rutinaria
- Especial

Las restricciones del presupuesto se pueden aplicar individualmente, para cada categoría cuando lo requiera la optimización o el análisis económico.

4.4.1.2. Costos de los usuarios de las carreteras. Se refiere a los costos debidos a los impactos del estado de la carretera, así como los estándares de diseño de ésta, sobre los usuarios. Se deben incluir los siguientes componentes de los costos de usuarios de las vías:

1. Costos de la circulación de los vehículos motorizados (VOC)

Los costos de circulación de los vehículos motorizados están compuestos por los grupos que se presentan a continuación:

- Consumo de combustible y lubricantes
- Consumo de neumáticos y repuestos
- Horas de trabajo
- Capital
- Conductor /chofer
- Generales

2. Costos de tiempo de viaje

Son los beneficios debidos a los ahorros en el tiempo de viaje, determinados a partir del cálculo de las velocidades de los distintos tipos de vehículos. Incluye los costos del tiempo de viaje de pasajeros y los de carga.

3. Costos de los accidentes

Un accidente se considera un evento que involucra uno o más vehículos en el cual se presentan muertos, heridos y/o daños materiales. La severidad de los accidentes se clasifica en:

- Fatales: Se considera fatal cuando hay una muerte dentro de un período fijo después de un accidente (se recomiendan 31 días).
- Heridos graves: se causan heridas, pero no resultan fatales
- Daños en propiedad: no se presentan heridos humanos sino solo daños a la propiedad por el accidente.

El modelo de evaluación debe permitir que estos costos debido a accidentes puedan ser o no incluidos en el análisis económico.

4.4.1.3. Efectos medioambientales. Se determinan los siguientes:

- Emisiones de los vehículos
- Consumo de la energía
- Ruido del tráfico

4.4.1.4. Beneficios económicos netos anuales. Entre cada par de opciones de inversión, los beneficios económicos netos anuales resultantes de la implantación de la opción m sobre la opción n se obtendrán combinando las diferencias de los costos de la administración, los costos de los usuarios y otros costos y beneficios.

4.4.2. Análisis económico. La evaluación de proyectos se realiza con el fin de poder decidir si es conveniente o no realizar un proyecto de inversión. Para este efecto, se debe no solamente identificar, cuantificar y valorar sus costos y beneficios, sino tener elementos de juicio para poder comparar varios proyectos coherentemente.

La evaluación se hace con base en los siguientes criterios, que se calculan a partir de los flujos de costos o beneficios con una tasa de descuento especificada por el usuario:

- Valor actual neto (VAN)
- Tasa interna de retorno (TIR)
- Relación costo/beneficio neto (BCR)
- Beneficios del primer año.

5. CONCLUSIONES

- Lo primero que se debe hacer antes de empezar a trabajar en HDM-4 es garantizar la adecuada configuración de la herramienta para que se desenvuelva acorde a las condiciones presentes a nivel local y que se ajuste lo mejor posible a las condiciones preponderantes de vías de la región a analizar, de modo que las categorías y rangos que allí se establezcan correspondan con lo que se observa en el medio.
- Los métodos utilizados en HDM 4 para estimar los impactos de las mejoras de carreteras en los usuarios de carreteras, redefinidos como efectos de usuarios de carreteras (RUE), deben considerarse como una mejora incremental de los métodos utilizados en HDM III en lugar de constituir un nuevo conjunto de procedimientos. Los desarrolladores del modelo han basado en gran medida las mejoras y las nuevas actualizaciones en estudios y métodos preexistentes, en lugar de desarrollar investigaciones específicamente calibradas a las condiciones de cada lugar.
- En ésta primera propuesta, a partir del modelo de efectos sobre los usuarios de las carreteras (RUE) del HDM-4 aplicado a las vías de Boyacá, se determinaron los parámetros relacionados con las condiciones imperantes de tránsito, de capacidad, de flujo de velocidad, de volúmenes de tránsito, de parámetros de geometría y de caracterización de los pavimentos; que son susceptibles de adaptar en la red vial departamental.
- Se determinaron los rangos y valores requeridos para definir la configuración de HDM-4 aplicado para las Vías de Boyacá, como función de las variables definidas por el sistema, acorde a lo establecido por las entidades competentes. En este sentido, como propuesta en el presente documento, se dispuso del análisis de los factores relacionados con la calibración del modelo RUE del HDM-4 y el cual podrá ser parte de los proyectos viales en las condiciones preponderantes de las vías de carácter departamental.
- De los modelos de tránsito, teniendo en cuenta que no era de total disponibilidad la información horaria de tránsito vehicular durante los 365 días del año y que se aspiraba a desarrollar un análisis más amplio, fue posible desarrollar un análisis básico del manejo que se debe dar a este tipo de información, en el momento en que se pueda disponer de ésta. Con esto, se definieron tres corredores con sus correspondientes modelos de tránsito, con las características expuestas de sección transversal y tránsito vehicular de cada caso.
- De acuerdo con los resultados obtenidos durante la calibración de los costos de usuario para las vías de Boyacá, se determinó que el consumo de combustible representa entre el 15 y el 30% de los costos de operación vehicular. De igual manera, el flujo vehicular en condiciones de congestión, generan un alto impacto en este consumo. Teniendo en cuenta que el consumo de combustible depende de la velocidad y del grado de congestión de la vía, se recomienda definir adecuadamente los parámetros del modelo de velocidad realizando una calibración del consumo de combustible en nivel 3, teniendo en consideración condiciones reales de congestión del lugar a analizar de manera que se definan consumos reales.
- El RUE está principalmente influenciado por la velocidad de los vehículos y la regularidad. En el desarrollo de la tesis se determinó que, el consumo de combustible y los lubricantes, que representan las variables de mayor incidencia dentro del modelo, debido a su alto costo en las vías de Boyacá, es muy sensible a

la velocidad, pero relativamente sensible a la regularidad. Por el contrario, el consumo de repuestos no es sensible a la velocidad, pero está muy influenciado por la regularidad.

- La calibración nivel 2 del modelo flujo – velocidad fue realizada a partir de mediciones de volumen y velocidad en 5 períodos de flujo definidos con la información de las estaciones maestras: pico, alto, medio y bajo. De las mediciones realizadas, se tenían 3 corredores viales. Para los 3 corredores, el comportamiento del modelo flujo – velocidad es muy similar al presentado en el modelo HDM-4, lo cual se debe a que simulan vías urbanas con flujo ininterrumpido, condiciones con las que el modelo fue diseñado. Se recomienda realizar una calibración nivel 3 del modelo flujo – velocidad en el que las ecuaciones originales de la herramienta sean ajustadas por un factor que contemple todos los tipos de vías.
- La calibración del factor de cumplimiento de velocidad (en función de la velocidad deseada) se realizó simultáneo a la calibración del modelo flujo - velocidad con las velocidades promedio obtenidas para flujo libre. De aquí se encontró que, el factor de cumplimiento es menor a 1, lo que indica que los usuarios transitan con velocidades menores a la velocidad límite. Este comportamiento es el esperado puesto que, a flujo libre, el conductor se verá influenciado por parámetros diferentes a la interacción vehicular como estado superficial y ancho de la vía.
- El modelo de consumo de lubricantes se refiere a la pérdida de aceite debido a la contaminación y a la operación pues depende exclusivamente del consumo de combustible. Del análisis de sensibilidad se obtuvo que tanto el flujo como la velocidad tienen un alto impacto en el consumo de combustible y por consiguiente en el consumo de lubricantes, sin embargo, se recomienda calibrar el modelo de consumo de lubricantes en conjunto con el consumo de combustible debido a que el primero depende directamente del segundo, quienes a su vez dependen de la velocidad, del flujo y de la condición superficial de la vía.
- El submodelo de consumo de partes constituye un componente significativo de los costos de operación vehicular que depende de la edad del vehículo y la rugosidad, así como de la variación de la velocidad. Considerando que la definición de estos parámetros dentro de la presente tesis se realizó a partir de investigaciones en entidades competentes, se pudo establecer del análisis de sensibilidad que, para este submodelo, los valores de recorrido anual y la vida útil, tienen un alto impacto en el consumo de partes.
- Los costos de depreciación y trabajos de mantenimiento permanecen constantes con el aumento del flujo; mientras que los costos de intereses, operarios y gastos generales aumentan considerablemente en las horas de congestión extrema.
- En diferentes países se tiene que el costo de mantenimiento y partes está ligado a los precios del mercado en cuanto a mano de obra y repuestos se refiere, sin embargo, del estudio del submodelo de mantenimiento se encontró que este se encuentra directamente relacionado con la cultura ciudadana en cuanto a mantenimiento vehicular se refiere. Por esta razón, la calibración de este submodelo es un elemento esencial para el análisis de costos de usuarios, adaptado específicamente para la región en evaluación. Se recomienda realizar la calibración de este modelo para las 4 clases de vehículos que se definieron para la flota vehicular en Boyacá: motos, automóviles, buses y camiones y midiendo por lo menos valores de velocidad, condición superficial de la vía en diferentes períodos de flujo vehicular y mantenimiento.

- Uno de los parámetros más importantes dentro de la calibración del modelo RUE del HDM-4 es la velocidad observada ARVMAX. La calibración nivel 2 del modelo velocidad – rugosidad aplicada en la presente tesis arrojó como resultado valores de ARVMAX mucho menores que los parámetros por defecto de HDM-4. Este parámetro fue calibrado a partir de las mediciones de velocidad a flujo libre en condiciones ideales de manera tal que la velocidad observada estuviera únicamente restringida por la rugosidad, sin embargo, debido a las condiciones geométricas que se presentan en las vías urbanas, el flujo vehicular presentado en horas denominadas de tránsito bajo, el límite de velocidad de la vía y el cumplimiento de políticas nacionales en las vías (retenes, etc), generaron valores de velocidad menores a los esperados en condiciones ideales, determinando finalmente menores valores de ARVMAX para cada tipo de vehículo. Por esta razón, se recomienda continuar empleando los valores de ARVMAX definidos en el HDM-4. Adicionalmente, se recomienda realizar una calibración de nivel 3 en este parámetro de manera que se pueda determinar directamente el valor de ARVMAX a partir de mediciones de la velocidad de rectificación.
- Es importante saber que no es suficiente seguir una secuencia de pasos que entreguen un valor que represente la totalidad de los costos operacionales de los vehículos, sino que es vital conocer y entender aspectos tales como la forma como se lleva a cabo la estimación de los consumos y los factores que inciden en el tiempo de desplazamiento de los vehículos, y el cálculo de ciertas variables ligadas con la operación de automóviles, buses y camiones. Así mismo, es trascendental conocer la incidencia que puede llegar a tener las condiciones físicas y de circulación de las vías de estudio y las variaciones en el tiempo sobre el resultado de los análisis.
- Como se ha mencionado anteriormente, esta tesis es una primera propuesta de lo que puede ser la calibración del modelo RUE del HDM-4, con miras a su implementación en vías de Boyacá, quedando abierto a los interesados del sector quienes trabajan en proyectos viales, y que pueden hacer uso de la actual configuración, con modificaciones particulares, en tanto se disponga de información más precisa de los proyectos.
- No obstante, es importante tratar de manejar la mayor cantidad de variables con valores reales con miras a reducir el margen de error que se pueda generar. Por eso, lo mejor que por ahora se puede hacer es aceptar el valor sugerido por defecto (cuando no se tenga un valor para adoptar), mientras se amplía la base de datos disponible y se corroboran algunos valores y factores con los cuales se refinaría la definición de las diferentes categorías de vehículo a nivel local.
- En esta misma línea, un aspecto muy sensible está relacionado con la representatividad de los modelos y la calibración de los mismos; en particular el modelo RUE que considera un número importante de datos de entrada y factores de ajuste para las variables principales, los cuales en muchos casos por ausencia de información es preciso trabajar con valores recomendados por defecto por el programa, haciendo pensar que la simulación se aleje de la realidad; sin embargo, es tan baja la sensibilidad y mínimo el efecto de algún cambio en los valores sugeridos, que es posible asegurar que hay un aval y tranquilidad alrededor de los resultados que se puedan alcanzar.

6. RECOMENDACIONES

- Este estudio presentó los resultados de una calibración básica de las relaciones HDM-4 para once tipos de vehículos de la flota de Boyacá. Además, se evaluaron las relaciones del modelo RUE del HDM-4 para las condiciones del Departamento comparando los resultados con los valores por defecto del HDM-4. Las predicciones RUE del HDM-4 que utilizan datos de calibración básicos mostraron que la mayoría de las relaciones RUE son sólidas y las predicciones pueden mejorarse mediante un ejercicio de calibración más detallado. Por lo tanto, para futuras investigaciones se recomienda centrar los esfuerzos en obtener estimaciones más confiables para los parámetros aquí obtenidos, y hacer mayor énfasis en la calibración de las relaciones de velocidad y capacidad, consumo de combustible y relaciones de neumáticos, aceites y lubricantes, con un nivel mayor de calibración. Todo esto, teniendo en cuenta que son los parámetros de mayor incidencia en el modelo de estudio.
- Deben siempre considerarse las condiciones locales del proyecto a estudiar, con el fin de lograr una correcta simulación de las emisiones de sustancias contaminantes, teniendo presente condiciones ambientales como clima, humedad, altitud, entre otras, las cuales inciden en el comportamiento de los pavimentos y el desgaste de los vehículos, aspectos sobre los cuales también se pueden abordar investigaciones.
- Para obtener mejores resultados y más precisos para los modelos de tránsito, se sugiere un acceso directo a la información horaria de tránsito vehicular de las diferentes estaciones maestras con las que cuenta la red vial nacional, debido a que actualmente no se tiene un vínculo directo entre los equipos de cada regional y el INVIAS.
- En cuanto a las relaciones de capacidad y flujo de velocidad, se deberá hacer un esfuerzo por tener estudios referentes a condiciones de vías tipo multicarril y de tres carriles (carril de ascenso), ya que las condiciones en que se presentan este tipo de vías en nuestro país no permiten tener información de esos tramos particulares, que en la mayoría de los casos no ocupan la totalidad de extensión de un sector determinado en la red vial.
- Para realizar la calibración de la velocidad restringida por la rugosidad (modelo velocidad - rugosidad) se recomienda establecer pistas de prueba en las cuales se realicen actividades de mantenimiento sobre la calzada, cuya finalidad sea exclusivamente mejorar la condición superficial (rugosidad), preferiblemente pistas de prueba con un IRI de 5 m/km o más.
- Del análisis de sensibilidad desarrollado se encontró que el consumo de neumáticos está en función de la condición de la vía, de la velocidad que varía según el tipo de vehículo, del tipo de llanta y del flujo vehicular. Teniendo en cuenta esto, se recomienda realizar la calibración de este submodelo monitoreando el consumo dentro de la flota vehicular (tomar un vehículo típico de cada grupo de vehículos), evaluando el cambio de llanta (o reencauche) según el número de kilómetros promedio que recorra cada vehículo, midiendo por lo menos valores de velocidad y la condición superficial de la vía en diferentes períodos de flujo vehicular con el fin de conocer los efectos de cada uno de estos tres parámetros en el consumo de neumáticos.

- Para la calibración de los tiempos de viaje de trabajo y de no trabajo, así como la ocupación vehicular, se recomienda realizar encuestas origen-destino para por lo menos las 11 categorías de vehículos definidas para la flota vehicular de Boyacá, teniendo en cuenta tiempos de espera de transporte, tiempos de transbordo y tiempos de caminata en los casos en que aplique (desde paradero hasta lugar destino). Para el caso de la ocupación vehicular, especialmente en vehículos pesados de servicio público (buses), se recomienda emplear el método del vehículo flotante donde se registren las encuestas origen-destino y la ocupación para los diferentes períodos de flujo vehicular.
- Es necesario definir la conformación más representativa para Colombia del parque automotor a utilizar en las modelaciones, así como las características básicas, los precios unitarios y los valores de los factores de ajuste y calibración que debe adoptar cada vehículo típico que represente una determinada categoría de automóviles, buses o camiones. De la adecuada estandarización que se logre en este aspecto será posible garantizar una mayor unidad de criterios en los estudios de evaluación y facilitarán la comparación de estudios y análisis cuando se emplee el HDM-4.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Altamira, H. De Solminihac, R. Harrison, and J. P. Covarrubias. (2004). "Calibration of fuel consumption model in HDM4 model: An Application to observed consumption in Canada and Chile," in 84th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC., 2004.
- Abaynayaka, S.W., Morosiuk G., y Hide H. (1977), Prediction of road construction and vehicle operating costs in developing countries. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 62 (Part 1), 419-446.
- ACCEFYN, (2003). "Línea base para proyectos de transporte masivo," Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá D.C.
- Altamira, A, et al. (2004). "Calibration of fuel consumption model in HDM-4 model: An application to observed consumption in Canada and Chile", First Draft Version One, Transportation Research Board, 26p.
- Altamira, A. (2003). Determinación del consumo de combustible de vehículos pesados sobre distintos tipos de pavimento. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería, 216 p.
- Altamira, H. De Solminihac, R. Harrison, and J. P. Covarrubias (2004). "Calibration of fuel consumption model in HDM4 model: An Application to observed consumption in Canada and Chile," in 84th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC., 2004.
- Archondo-Callao, R. (1994). HDM Manager Version 3.0. 0. Transportation Division, Transportation, Water & Urban Development Department. Washington DC: The World Bank.
- Archondo-Callao, R. y Purohit R. (1989). HDM-PC: user's guide. The Highway Design and Maintenance Standards Series. Washington DC: The World Bank.
- Bein, P. (1993). Evaluation of State-of-the-art VOC Models. Road & Transport Research 2, Australian Road Research Board, Nunawading.
- Bennett, C.R. (1994). A Speed Prediction Model for Nueva Zelandia. School of Engineering Report 368, Department of Civil Engineering, University of Auckland.
- Bennett, C.R. (1995). Modelling Depreciation, Interest, Utilisation, Crew y Overhead Costs in HDM-4. Report to the International Study of Highway Development y Management Tools, University of Birmingham.
- Bennett, C.R. (1995). Review of Experience Adapting the HDM Vehicle Operating Costs Model. Report to the International Study of Highway Development and Management Tools, University of Birmingham.

- Bennett C.R. (1996). Modelling Capital Costs HDM-4 Report to the International Study of Highway Development and Management Tools University of Birmingham, UK.
- Bennett C.R., and Greenwood I.D., (1996) Specifications for the HDM-4. Road User Effects Model. Third and fourth Draft International Study of Highway Development and Management Tools University of Birmingham, UK
- Bennett, C.R. (1998). Modelling Road User Effects in HDM-4. International Study of Highway Development y Management Tools, University of Birmingham.
- Bennett, C.R. y Greenwood, I.D. (1999). Modelling Road User y Environmental Effects in HDM-4. Final Report Asian Development Bank Technical Assistance Project 5819- REG. To be published as Volumen 7, the Highway Development y Management Series, the World Road Association (PIARC) y the World Bank, Paris.
- Biggs, D. y Akcelik, R. (1987). Estimating effect of vehicle characteristics on fuel consumption. En: Journal of Transportation Engineering. Enero. vol. 113, no. 1, p. 101-106.
- Cerquera, Flor A. (2007). Capacidad y Niveles de servicio de la infraestructura vial. Tunja: Banco de Objetos Institucional de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Chang, C. Meléndez, J (2001). Aplicabilidad del Modelo HDM-III en la evaluación de proyectos viales. Ponencia presentada al XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- Chesher, A., y R. Harrison (1987). Vehicle Operating Costs: Evidence from Developing Countries. World Bank Publications, Washington, D.C.
- CRRRI (1982). Road user cost study in India. Final Report, New Delhi: Central Road Research Institute.
- Cundill, M.A., y Withnall S.J. (1985). Road transport investment model RTIM3. In: TRB. Sixth International Conference on Low-Volume Roads, Conference Proceedings 6, Volume 1. Washington DC: National Academy Press, 187-192.
- Curtayne, P.C., Visser, A.T., du Plessis, H.W. y Harrison, R. (1987). Calibrating The Relationships Between Operating Costs of Buses y Road Regularidad on Low-Volumen Roads. Transportation Research Record 1106, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Daniels, C. (1974). Vehicle Operating Costs in Transport Studies. EIU Technical Series No. 1, The Economist Intelligence Unit, London.
- Geipot (1982). Research on the interrelationships between costs of highway construction, maintenance and utilisation (PICR). Final report, 12 volumes, Brasilia, Brazil.
- Greenwood, I.D. (1997). Calculating Tyre Diameter. Memo to the ISOHDM Study, University of Birmingham.

- Greenwood, Ian; dunn, Roger y raine, Robert. (2007). Estimating the effects of traffic congestion on fuel consumption and vehicle emissions based on acceleration noise. En: Journal of Transportation Engineering. Febrero. vol. 133, no. 2, p. 96-104. ISSN 0733-947X/
- Harral, C G and others. (1979). The Highway Design And Maintenance Standards Model (HDM): Model Structure, Empirical Foundations And Applications. PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick. London: PTRC Education and Research Services.
- Hoban, C.J. (1987). Evaluating traffic capacity and improvements to geometry. Technical Paper Number 74. Washington DC: The World Bank.
- Hoban, C.J., Reilly, W. y Archondo-Callao, R. (1994). Economic Analysis of Road Projects with Congested Traffic. World Bank Technical Paper, Transport Division, The World Bank, Washington, D.C.
- HTC (1999). Calibración of HDM Speed Prediction Model to Tailandia. Report to Dessau-Sophrin. HTC Infrastructure Management Ltd., Auckland.
- I. Greenwood, R. Dunn, and R. Raine. (2007). "Estimating the effects of traffic congestion on fuel consumption and vehicle emissions based on acceleration noise," Journal of Transportation Engineering, vol. 133, pp. 96 – 104.
- Ingenierocivilinfo.com. (2019). INGENIERIA CIVIL. [online] Available at: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/> [Accessed 20 Jun. 2019].
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2016). Volúmenes de tránsito 2008. [Base de datos en archivo]. Bogotá D.C.: el Instituto. Colombia.
- ISOHDM. (1995). Predicting changes in accident rates in developing countries following modifications in road design International Study of Highway Development and Management School of Civil Engineering, The University of Birmingham.
- ISOHDM. (1993). Proceedings: Inception Workshop. Report to the International Study of Highway Development and Management Tools, University of Birmingham.
- ISOHDM. (2002), "Volume 5: A Guide to Calibration and Adaptation", Birmingham: Universidad de Birmingham, 229 p.
- Kerali, H.R., Parsley L.L., Robinson R., y Snaith M.S. (1985). Development of a microcomputer based model for road investment in developing countries. In: CIVILCOMP. Proceedings of the Second International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, London, December 1985. London: Institution of Civil Engineers.
- MINISTERIO DE TRANSPORTE. (2004, 12 28). RESOLUCIÓN 4100 DE 2004. Imprenta Nacional de Colombia, pp. 1, 2.
MINISTERIO DE TRANSPORTE. (2009, 05 08). RESOLUCIÓN 1178 DE 2009. Imprenta Nacional de Colombia, pp. 1, 2.
- Moavenzadeh, F. (1972). Investment strategies for developing areas: analytical models for choices of strategies in highway transportation. Department of Civil

Engineering Research Report No 72-62. Cambridge Mass (Massachusetts Institute of Technology).

- Moavenzadeh, F., Stafford J.H., Suhbrier J., y Alexander J. (1971). Highway design study phase I: the model. IBRD Economics Department Working Paper No 96. Washington DC: International Bank for Reconstruction and Development.
- Morosiuk, G., y Abaynayaka S.W. (1982). Vehicle operating costs in the Caribbean: an experimental study of vehicle performance. TRRL Laboratory Report 1056. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- NDLI. (1995). Modelling Road User Effects in HDM-4. Report to the Asian Development Bank, N.D. Lea International Ltd., Vancouver, B.C., Canada.
- NDLI (1995a). Modelling Road User Effects in HDM-4. Report to the Asian Development Bank, N.D. Lea International Ltd., Vancouver, B.C., Canada.
- NDLI. (1997). Gujarat Project Co-ordinating Consultancy: Road User Effects Calibration. N.D. Lea International, Vancouver, B.C., Canada.
- Odoki et al. (2000). An Integrated Model for Quantifying Accessibility-benefits in Developing Countries. Transportation Research Part A, 35 (7), pp. 25-47.
- Odoki J.B., and Kerali H.G.R. (1999). Modelling Non-motorised Transport in HDM-4 - TRB, Paper No. 991129. Transportation Research Board, 78th Annual Meeting, Washington D.C., USA.
- PADECO. (1996), Co., Ltd. Non-Motorized Transport (NMT) Modeling in HDM-4. (Draft Final Report). Report prepared for World Bank, Transportation, Water and Urban Development Department, Washington, DC: World Bank.
- Parsley, L.L., y Robinson R. (1982). The TRRL road investment model for developing countries (RTIM2). TRRL Laboratory Report 1057. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Paterson, W.D.O. (1987). Road Deterioration y Maintenance Effects: Models for Planning y Management. World Bank Publications, Washington, D.C.
- Posada Henao, J., & González - Calderón, C. (2013). Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera –modelos predictivos–. REVISTA Ingenierías Universidad de Medellín, 12(23), 35-46. En <https://doi.org/10.22395/rium.v12n23a3>
- Posada Henao, J., & González-Calderón, C. (2013). Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera –modelos predictivos–. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 12 (23), 35-46.
- Posada, J. (2012). “Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones” Doctorado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Riley, M.J. and Smith, R.A.W. (1989). Application of the World Bank’s HDM III to Highway Network Planning in Indonesia. Draft Notes of a Presentation at the 1989

Conference on Planning, Construction and Maintenance of Toll Roads and Highways in Indonesia, Jakarta.

Solminihac, H. (2005). *Gestión de Infraestructura Vial*. Tercera Edición.

TNM. (2009). Technology and Managment Ltd. Contrato IDU-BM-112 DE 2009. Evaluación de costos de usuario de acuerdo a las intervenciones que realiza el instituto en Bogotá D.C.

Transit (1997). *Friction & Tyre Abrasion Characteristics of Nueva Zelandia Road Surfaces*. Research Report 94. Transit Nueva Zelandia, Wellington.

Watanatada, T et al. (1987). *The Highway Design And Maintenance Standards Model Volume 1: Description of the HDM-III Model*. The Highway Design and Maintenance Standards Series. The World Bank, Johns Hopkins Press, Baltimore, USA.

Watanatada T et al. (1987a). *The Highway Design and Maintenance Standards Model - Volume 1: Description of the HDM-III Model*. The Highway Design and Maintenance Standards Series.

Watanatada, T., Dhareshwar, A.M., y P.R.S. Rezende-Lima (1987c). *Vehicle Speeds y Operating Costs: Models for Road Planning y Management*. World Bank Publications, Washington, D.C.

Watanatada, T., Harral, C.G., Paterson, W.D.O., Dhareshwar, A.M., Bhandari, A., y K. Tsunokawa (1987a). *The Highway Design y Maintenance Standards Model: Volumen 1 - Descripción of the HDM-III Model*. World Bank Publications, Washington, D.C.

Watanatada, T., Harral, C.G., Paterson, W.D.O., Dhareshwar, A.M., Bhandari, A., y K. Tsunokawa (1987b). *The Highway Design y Maintenance Standards Model: Volumen 2 - User's Manual for the HDM-III Model*. World Bank Publications, Washington, D.C.

World Road Association. (2000). *The Highway Development and Management Series, Volume One a Volume Five*. World Road Association, Francia.

Yuli, P. (1996). *Development of Speed y Fuel Consumption Models for Chinese Vehicles*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Birmingham.