

**“DESARROLLO DE PROYECTO PILOTO PARA LA CONFIGURACIÓN Y
PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO HDM-4 A LAS CONDICIONES DE GUATEMALA”**

INFORME FINAL

**“Definición de la propuesta de configuración y parametrización del
HDM-4 a las condiciones locales de Guatemala”**

1ª Versión

PRESENTADO A:



28 de septiembre 2022

Ficha Técnica

1. Informe No.: P082206-095-1	2. Código del Proyecto: P082206-095	3. Número de Páginas: 59	
4. Nombre del Proyecto: Desarrollo de proyecto piloto para la configuración y parametrización del modelo HDM-4 a las condiciones de Guatemala		5. Tipo de Informe: Informe Técnico	
6. Título del Informe: Definición de la propuesta de configuración y parametrización del HDM-4 a las condiciones locales de Guatemala		7. Fecha del Informe: 28 de septiembre del 2022	
8. Autor(es): Mauricio Salgado T. Angélica Méndez R. Francisco Varela C.		9. No. de Contrato:	
10. Nombre y Dirección del Receptor del Informe: FUNDESA Guatemala		11. No. Propuesta GesInfra:	
12. Nombre y Dirección del Mandante y/o Patrocinante: FUNDESA Guatemala		13. Referencia:	
14. Resumen: El presente informe contiene la síntesis de los aspectos considerados en la definición de la configuración y parametrización del HDM-4 sugerida, para ser empleada en la evaluación y modelación de proyectos de infraestructura vial para las condiciones de Guatemala, los cuales componen la estructura y contenido de los archivos "object" del HDM-4 que se sugiere sean utilizados en adelante como la base estandarizada y el punto de partida para el uso y aplicación del software HDM-4 en Guatemala. El informe se encuentra estructurado conforme a la definición hecha para cada uno de los módulos que componen el espacio de trabajo del HMD-4, los cuales fueron establecidos conforme a las características y condiciones típicas que se identificó se encuentran presentes en Guatemala, permitiendo con ello la adaptación inicial del software a las condiciones locales, así como facilitar y estandarizar el uso de la herramienta en el contexto vial de Guatemala. Dentro de los aspectos que se incluyen dentro del contenido del presente informe se destacan la definición y alimentación de los submódulos que componen: el módulo CONFIGURACIÓN (Parámetros agregados, zonas climatológicas, modelos de tráfico, relaciones de velocidad/capacidad, series de calibración, entre otros.), definición del contenido módulo FLOTA VEHICULAR aplicable en la modelación con HDM-4 para Guatemala (flotas vehiculares, tipos de vehículos y sus correspondientes características) y definición de la estructura y contenido del módulo ESTANDARES DE TRABAJO (estándares de conservación y estándares de mejoramiento) aplicable al contexto del mantenimiento y desarrollo vial de Guatemala. Adicionalmente en el informe se explica la forma como se alimentó preliminarmente el módulo RED DE CARRETERAS con el fin de facilitar el proceso de aplicación y uso de la herramienta por parte de los diferentes usuarios del HDM-4 en Guatemala. Finalmente dentro del informe se incluyen las referencias técnicas y las fuentes de información utilizadas para la configuración de cada módulo del HDM-4, lo cual incluye la información recopilada y procesada a partir del desarrollo de los talleres llevados a cabo en las mesas de trabajo convocadas para la iniciativa de configurar y parametrizar preliminarmente el software a las condiciones locales del país.			
15. Palabras Clave: HDM-4, configuración y parametrización.	16. Clasificación de Seguridad: No Clasificado	17. Elaboró: AMR FVC	18. Aprobó: MST

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Marco y contexto de la Consultoría.....	1
2	Módulo de Configuración	3
2.1	Modelos de Tránsito	3
2.1.1	Ajuste de los Modelos de Tránsito.....	4
2.2	Relaciones de Velocidad y Capacidad	9
2.2.1	Modelos de Capacidad/Velocidad Manual de Carreteras.....	11
2.3	Zonas Climáticas	12
2.3.1	Clasificación Climatológica Sugerida para Guatemala	14
2.4	Datos y Tablas Agregadas	19
2.4.1	Datos y Tablas Agregadas preasignadas para Guatemala.....	19
2.4.1.1	Volumen de Tránsito.....	19
2.4.1.2	Calidad de Compactación	20
2.4.1.3	Deterioros Superficiales.....	20
2.4.1.4	Capas Asfálticas.....	23
2.4.1.5	Resistencia del Pavimento.....	24
2.4.1.6	Irregularidad	25
2.4.1.7	Textura Superficial.....	27
2.4.1.8	Tipo de Geometría.....	28
2.5	Series de Calibración.....	30
2.5.1	Series de Calibración en Guatemala	30
2.6	Tipos de Accidentes	34
2.6.1	Tipos de Accidentes en Guatemala.....	34
3	Flota Vehicular y Estándares de Trabajo	35
3.1	Flota Vehicular	35
3.1.1	Resultados de la Definición de Flota Vehicular de HDM-4 aplicable a Guatemala.....	35
4	Estándares de Trabajo	39
4.1.1	Tipos de Estándares Según la Superficie de Rodadura	40
4.1.2	Estándares de conservación Sugeridos.....	41
4.1.3	Estándares de Mejora	48
4.1.3.1	Valor Residual	51
4.1.4	Tramos de Construcción Nueva	53
4.1.4.1	Valor Residual	53

5 Implementación de la Configuración y Parametrización del HDM-4	54
5.1 Red de Carreteras	54
5.2 Red de Carreteras de Guatemala	54
5.3 Herramientas de Análisis	55
5.3.1 Análisis de Proyecto.....	55
5.3.2 Análisis de Estrategia.....	55
5.3.3 Análisis de Programa	56
6 Conclusiones y Recomendaciones	57
6.1 Conclusiones	57
6.2 Recomendaciones	58
7 Bibliografía.....	59

ANEXOS

Anexo 1. Talleres elaborados en las mesas de trabajo

Anexo 2. Estándares de conservación definidos en el software HDM-4

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema descriptivo de la elaboración de los modelos de tránsito en HDM-4	4
Figura 2-2 Ejemplo de Curva Capacidad/Velocidad en HDM-4	8
Figura 2-3 Ejemplo de Curva Capacidad/Velocidad en HDM-4	9
Figura 2-4 Ejemplo de Curva Capacidad/Velocidad en HDM-4	10
Figura 2-5 Tipología de carreteras para la clasificación vial de Guatemala	11
Figura 2-6 Esquemas de tipos de carreteras para la clasificación vial de Guatemala	12
Figura 2-7 Mapa de línea base de aridez de Guatemala	17
Figura 2-8 Valores promedio del inicio y final de la época lluviosa en Guatemala	18
Figura 2-9 Valores referenciales de IRI Fuente: Manual Centroamericano de mantenimiento de Carreteras (CEPREDENAC, 2010).....	27
Figura 3-1 Costos económicos unitarios de flota vehicular	37
Figura 3-2 Características básicas de los tipos de vehículos motorizados definidos para la flota vehicular de Guatemala.....	37
Figura 4-1 Estándares de conservación definidos para Guatemala	42
Figura 4-2 Estándares de mejora definidos para Guatemala	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Modelos generales de Tránsito en HDM-4 para Guatemala	6
Tabla 2-2 Modelos generales de capacidad /velocidad en HDM-4 para Guatemala	12
Tabla 2-3 Clasificación de Humedad en HDM-4	13
Tabla 2-4 Clasificación de Temperatura en HDM-4	13
Tabla 2-5 Propuestas de clasificación regional para uso exclusivo de la configuración del HDM4 a las condiciones locales de Guatemala.....	15
Tabla 2-6 Clasificación por Humedad para Guatemala.....	15
Tabla 2-7 Clasificación por Temperatura para Guatemala.....	15
Tabla 2-8 Tabla Agregada TMDA Guatemala.....	20
Tabla 2-9 Calidad de Compactación de las Mezclas Asfálticas	20
Tabla 2-10 Descripción del Deterioro Superficial Pavimento Asfáltico	22
Tabla 2-11 Descripción del Deterioro Superficial Pavimento de Hormigón	23
Tabla 2-12 Espesores de Capas de un Pavimento Asfáltico.....	24
Tabla 2-13 Adecuación Estructural de los Pavimentos Asfálticos	24
Tabla 2-14 Adecuación Estructural de los Pavimentos de Hormigón.....	25
Tabla 2-15 Clasificación de la condición de los caminos no pavimentados según el espesor de la capa granular.....	25
Tabla 2-16 Irregularidad Característica Caminos Pavimentados (m/km)	26
Tabla 2-17 Irregularidad Característica Caminos No Pavimentados (m/km).....	26
Tabla 2-18 Categorización de Textura Superficial	28
Tabla 2-19 Descripción Geométrica de las vías en Guatemala	29
Tabla 2-20 Descripción Geométrica de las vías en Guatemala	31
Tabla 3-1 Flota vehicular representativa para Guatemala	36
Tabla 3-2 Series de crecimiento de tránsito para la flota vehicular	38
Tabla 3-3. Tasa de crecimiento para el tipo de vehículo según la flota vehicular definida	39
Tabla 4-1. Acciones de mantenimiento para los estándares de conservación	40
Tabla 4-2. Estándares de conservación sugeridos para los diferentes tipos de pavimentos	43
Tabla 4-3. Estándares de mejora sugeridos para los diferentes tipos de pavimentos	49
Tabla 4-4 Valores Residuales de los Mejoramientos	52
Tabla 4-5 Valores Residuales de los Tramos Nuevos (%).....	53

1 INTRODUCCIÓN

A partir de la iniciativa “Guatemala no se detiene” la cual tiene dentro de sus objetivos fortalecer la competitividad del país en diversos ámbitos, FUNDESA ha venido identificando distintas estrategias que permitan contribuir al fortalecimiento del sector de infraestructura de Guatemala y más específicamente a la infraestructura vial interurbana del país.

En este sentido se detectó que mediante la implementación de sistemas de gestión de infraestructura vial el país, podía efectivamente contribuir a un salto significativo del país en cuanto a competitividad se refiere, sabiendo que contar con un sistema robusto para la toma de decisiones para el manejo eficiente y coherente de los recursos destinados al crecimiento, desarrollo y sostenibilidad de las carreteras del país, debiera ser el camino a seguir.

Luego, la posibilidad de aprovechar la herramienta de gestión de infraestructura vial conocida como HDM-4, empleándola como mecanismo de soporte para la toma de decisiones en materia vial en Guatemala y la base como componente de un sistema de gestión serviría como punto de partida en el trabajo a desarrollar en este proceso.

Por lo tanto, comenzar por la configuración y parametrización del HDM-4 a las condiciones locales de Guatemala, además de servir como mecanismo de organización y estandarización de la información de la red vial de país, permitiría dentro de un tiempo razonable contar con una herramienta base de soporte para un sistema de gestión de infraestructura vial como el que requeriría para poder lograr el desarrollo del objetivo de aumentar la competitividad del país en lo que a esta materia se refiere.

A partir del diagnóstico anteriormente descrito se decidió desarrollar un trabajo de sensibilización y participación de diferentes actores relacionados con el ámbito vial en Guatemala, de modo que se iniciará un proceso que facilitará y fomentará el uso de la herramienta HDM-4 en la gestión y evaluación de proyectos viales del país, comenzando con la configuración y parametrización del software a las condiciones locales mediante actividades de capacitación en el uso del software, desarrollo de mesas de trabajo para el levantamiento de datos pertinentes sobre el ámbito vial de Guatemala y la consolidación de los insumos provenientes de los talleres desarrollados y la consulta de documentación y fuentes locales de información, con el objeto de definir y conformar los archivos “object” necesarios para la utilización del HDM-4 en las condiciones propias de Guatemala.

Finalmente, el presente informe como los archivos “object” del HDM-4 resultantes del proceso antes descrito representan el resultado del trabajo desarrollado y el punto de partida para la consolidación futura de un sistema de gestión de infraestructura vial para Guatemala que contribuya y redunde en un aumento de la competitividad del país.

1.1 Marco y contexto de la Consultoría

La infraestructura vial como uno de los pilares distintivos de la competitividad de un país requiere de herramientas que permitan establecer una dinámica acorde a las características propias de cada país, para establecer la toma de decisiones bajo criterios sólidos. Basado en lo anterior, con el fin de fortalecer los procedimientos, metodologías y herramientas de evaluación de iniciativas de inversión de proyectos de infraestructura vial, FUNDESA ha contratado a GesInfra con el fin

de crear una versión preliminar enfocada a las características de Guatemala con la herramienta de gestión HDM-4, mediante la configuración y parametrización de la misma, procurando con ello una contribución concreta a la estandarización y mejoramiento de los protocolos de evaluación.

El HDM-4 es un software diseñado para desarrollar análisis y evaluaciones requeridas frecuentemente en la planificación y toma de decisiones sobre proyectos de mantenimiento, rehabilitación y/o mejoramiento de la infraestructura vial interurbana. En este sentido, el presente informe contiene la síntesis de los aspectos considerados en la definición de la configuración y parametrización del HDM-4 recomendada, para ser empleada en la evaluación y modelación de proyectos de infraestructura vial para las condiciones de Guatemala, los cuales componen la estructura y contenido de los archivos "object" del HDM-4 que se sugiere sean utilizados en adelante como la base estandarizada y el punto de partida para el uso y aplicación del software HDM-4 en Guatemala.

Para tener una mejor aproximación a las condiciones locales, se realizaron tres mesas de trabajo de manera presencial conformadas por especialistas en temas de infraestructura vial, con el fin de realizar cuatro talleres que fueron programados cada dos semanas. Las tres mesas propuestas fueron: mesa de configuración, mesas de estándares y especificaciones técnicas y mesas de asuntos y parámetros económicos. Los talleres se realizaron en jornadas de tres horas donde se tenía acompañamiento de manera virtual por parte de los ingenieros de GesInfra para aclarar dudas y realizar las explicaciones necesarias para cumplir con el objetivo de los talleres.

Dentro de los aspectos que se incluyen dentro del contenido del presente informe se destacan la definición y alimentación de los submódulos que componen:

- **MÓDULO CONFIGURACIÓN:** Este módulo está conformado por parámetros agregados de la red de carreteras, zonas climatológicas, modelos de tráfico, relaciones de velocidad/capacidad, series de calibración, entre otros.
- **MÓDULO FLOTA VEHICULAR:** Aplicable en la modelación con HDM-4 para Guatemala (flotas vehiculares, tipos de vehículos y sus correspondientes características) y definición de la estructura.
- **MÓDULO ESTÁNDARES DE TRABAJO:** Conformado por estándares de conservación y estándares de mejoramiento, aplicable al contexto del mantenimiento y desarrollo vial de Guatemala.
- **RED DE CARRETERAS:** Listado de rutas representativas de la red vial de Guatemala, relacionado sus características de manera preliminar, con el fin de facilitar el proceso de aplicación y uso de la herramienta. Dichas características deben ser verificadas y actualizadas a las condiciones de cada proyecto.

Adicionalmente dentro del contenido del informe se relacionan todas las referencias técnicas y las fuentes de información utilizadas para la configuración de cada módulo del HDM-4, lo cual incluye la información recopilada y procesada a partir del desarrollo de los talleres llevados a cabo en las mesas de trabajo convocadas para la iniciativa de configurar y parametrizar preliminarmente el software a las condiciones locales del país.

Finalmente, este documento busca ser una guía para la buena práctica de la herramienta que está parametrizada bajo las condiciones de Guatemala, teniendo en cuenta que cada proyecto debe ser analizado de manera cuidadosa para ajustarse a las condiciones de cada caso

específico, bajo la premisa de que esta versión preliminar representa condiciones globales de algunos parámetros que deben ser ajustados con estudios de mayor detalle debido a la falta de información existente, y por tanto necesita criterio de experto en algunos parámetros a evaluar para obtener resultados óptimos para la toma de decisiones.

2 MÓDULO DE CONFIGURACIÓN

Las aplicaciones de HDM-4 han sido desarrolladas para hacer uso de diversos datos y la calidad que estos representen. En el módulo de configuración de HDM-4, el software, proporciona la opción de personalizar la operación de este y reflejar la normativa vigente o habitual del entorno de nuestro país.

El HDM-4 tiene un depósito de parámetros de forma precargada los cuales son editables, en el caso de Guatemala se actualizaron los datos con información propia y cuando no se tenía ningún documento de soporte se respetaron los valores al recomendado por la herramienta. Dentro de los datos que por defecto tendrá el **módulo de configuración** para Guatemala para algunos parámetros específicos, se encuentran:

1. Zonas Climáticas
2. Datos y Tablas Agregadas de tramo
3. Series de Calibración de deterioros

Para el ingreso de los datos de cada uno de los ítems que representa el módulo de configuración, se consultó a las normativas imperantes en el país, literatura especializada en gestión vial, estudios de deterioros de pavimentos, estudios de análisis climáticos, etc. Con el fin de reflejar cabalmente la realidad de la red vial de Guatemala.

2.1 Modelos de Tránsito

Los modelos de tránsito son necesarios para describir los patrones del flujo vehicular de cada categoría de la carretera. Idealmente, se tendería a pensar que el flujo vehicular que circula por determinada carretera es constante, sin embargo, se pueden encontrar variaciones en la congestión vehicular durante un mismo día, días de la semana o incluso meses del año. A manera de ejemplo, rutas que funcionan como acercamientos a fuentes laborales, tienen momentos peak de congestión vehicular a ciertas horas del día y a la vez, hay poco flujo vehicular durante los fines de semana.

HDM-4, en la sección de Modelos de tránsito, cuantifica de manera discreta los diferentes niveles de congestión del tráfico. Para definir la distribución de flujos horarios durante las 8760 horas que tiene un año, el TMDA debe ser convertido a flujo por hora. El análisis de congestión se realiza, a través de un número determinado de niveles de flujo horario, cuyo resultado combinado representará la totalidad del año y es ordenado de manera decreciente en un histograma de distribución. Lo usual es que los altos flujos representen períodos de duración cortos. Es así como se presenta las distribuciones anuales que se configuran en el HDM4. En la Figura 2-1 se representa mediante un esquema secuencial la manera como se obtiene el histograma de distribución mediante el comportamiento diario del flujo vehicular de una unidad vial.

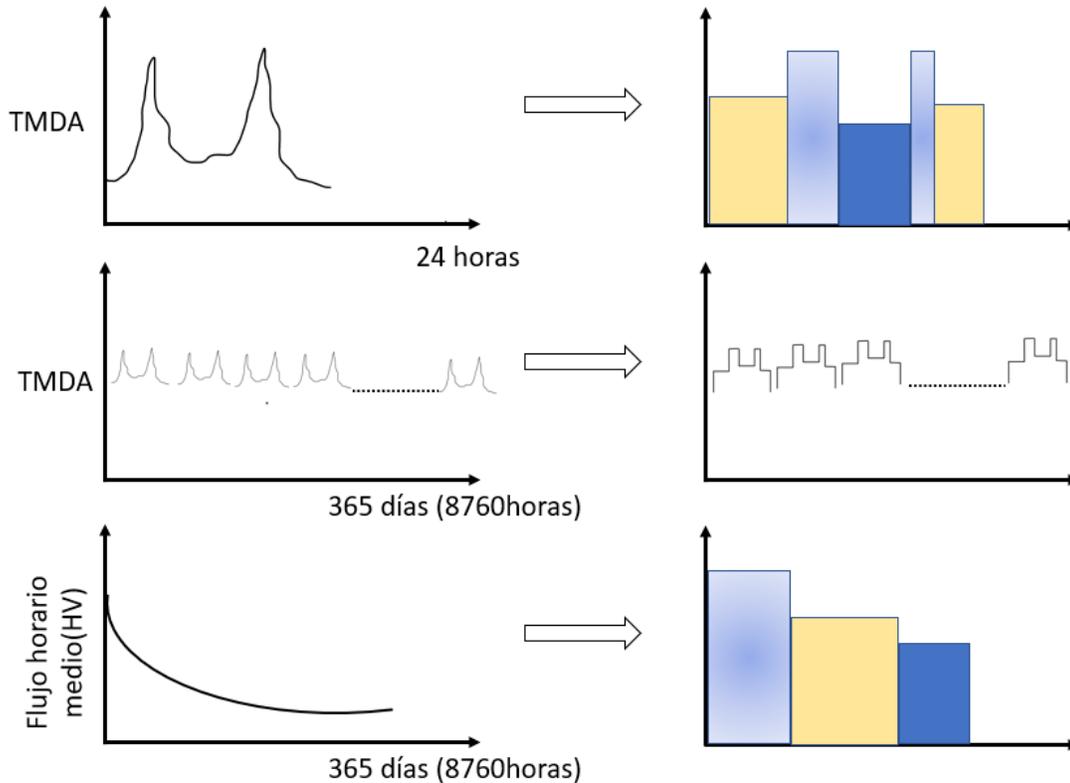


Figura 2-1 Esquema descriptivo de la elaboración de los modelos de tránsito en HDM-4
 Fuente: Elaboración propia

2.1.1 Ajuste de los Modelos de Tránsito

El comportamiento del flujo vehicular en lo que respecta a Guatemala se define teniendo como base el set propuesto de los modelos estándar que se reportaron en las mesas de trabajo, los cuales básicamente sirven para describir las distribuciones que típicamente se presentan en los distintos tipos de comportamiento del flujo vehicular a lo largo de un año en los diferentes tipos de carretera y desplazamientos que se presentan en el país; dichos modelos fueron relacionados para casos propuestos según la clasificación vial existente en Guatemala. Basado en lo anterior, se pudieron identificar dos categorías principales que son los caminos de tránsito mixto (vías interurbanas) y caminos con variaciones estacionales, dichas categorías adicionalmente pueden presentar variaciones según el comportamiento del tráfico y el número acumulado de horas al año.

Un tránsito estacional, corresponde a aquellas variaciones del tránsito que tengan una componente estacional marcada, causada principalmente por el componente turístico. Por otra parte, un tránsito mixto se encuentra asociado a carreteras con variaciones estacionales moderadas o que no presentan una componente especializada preponderante.

En lo que refiere al HVp, este se define como el Volumen Horario. Se puede calcular como la razón entre el Tráfico horario y el TMDA de la carretera. Cabe señalar que el valor de HVp de la

hora 30 es mayor que el de la hora 100, por motivos que el HVp se obtiene a partir de una ordenación decreciente de los mayores volúmenes registrados a lo largo de un todo un año. Por otra parte, mientras no se produzcan cambios importantes en las actividades de la ruta, la relación entre HVp y el TMDA se mantendrá constante en el tiempo

Debido a lo antes expuesto, se definen siete modelos principales que caracterizan diferentes tipos de flujo vehicular que pueden presentarse en Guatemala. En la Tabla 2-1 se muestra los valores propuestos para la definición de cada modelo, que enmarca el flujo horario medio y el número acumulado de horas en el año. De igual forma se presenta el histograma de distribución de los datos de flujo. Cada modelo se define mediante una codificación y una descripción con el fin de identificar de manera fácil cada modelo que pretende simular.

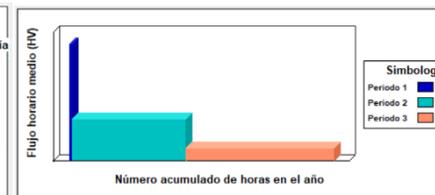
Es recomendable no realizar ninguna alteración a los siete modelos principales. En caso de considerar realizar una modificación a algún modelo se puede hacer una copia del que considere pueda variar algún valor y generar otro modelo adicional.

A continuación, se lista los 7 modelos de la primera serie propuesta y su respectiva descripción:

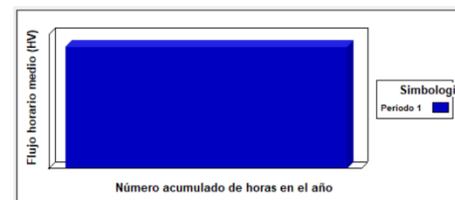
1. 1M1 Distribución relativamente constante durante el año con alto tráfico vehicular
2. 1M2 Distribución con múltiples horas de saturación y cortos periodos valle
3. 1M3 Distribución variable del tránsito (Típico interurbano)
4. 1M4 Distribución con largos periodos valle y con alto tránsito en pocas horas punta (Estacional)
5. 1M5 Distribución con periodo punta con tránsito muy elevado (Estacional)
6. 1M6 Distribución relativamente constante
7. 1M7 Distribución constante (Sin influencia del tráfico)

Tabla 2-1 Modelos generales de Tránsito en HDM-4 para Guatemala

MODELO	1M1 Distribución relativamente constante durante el año con alto tráfico vehicular			1M2 Distribución con múltiples horas de saturación y cortos periodos valle			1M3 Distribución variable del tránsito (Típico interurbano)			1M4 Distribución con largos periodos valle y con alto tránsito en pocas horas punta (Estacional)		
	Periodo	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)	%de TPDA (PCNADTp)	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)	%de TPDA (PCNADTp)	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)	%de TPDA (PCNADTp)	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)
1	1825	0,06	31,5	2190	0,09	57,0	73	0,14	2,8	100	0,17	4,7
2	1825	0,06	30,0	1460	0,06	25,2	73	0,12	2,4	3760	0,06	65,9
3	1095	0,05	15,0	1095	0,03	9,6	256	0,09	6,6	4900	0,02	28,2
4	1460	0,04	15,2	1460	0,02	6,4	401	0,07	7,8			
5	2555	0,01	8,4	2555	0,00	2,1	3650	0,05	47,0			
6							4307	0,03	33,0			



MODELO	1M5 Distribución con periodo punta con tránsito muy elevado (Estacional)			1M6 Distribución relativamente constante			1M7 Distribución constante (Sin influencia del tráfico)			
	Periodo	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)	%de TPDA (PCNADTp)	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)	%de TPDA (PCNADTp)	Hrs por año (HRYP)	Volumen Horario (HVp)	%de TPDA (PCNADTp)
	1	500	0,24	33,0	400	0,05	5,6	8760	0,04	100,0
	2	960	0,11	29,5	3360	0,05	41,4			
	3	1825	0,03	16,0	5000	0,04	53,4			
	4	2555	0,02	11,2						
	5	2920	0,01	10,4						



Adicionalmente se proponen una serie de combinaciones de casos determinados por el origen/destino de los viajes de los vehículos y la clasificación vial de las carreteras de Guatemala. La serie 2 representando grandes movimientos de flujos mixtos en las vías centroamericanas diferenciando por la dirección del tránsito, la serie 3 de flujos mixtos en vías nacionales, la serie 4 pensada para vías de movimientos de carga de centros de producción tradicional hacia los puertos principales y la serie 5 para las vías con flujo de turismo.

Las series 2 y 3 relacionadas anteriormente se definen en base a las mesas de trabajo donde se presentaban modelos de tránsito que describían un comportamiento del flujo, bajo los cuales identificaron en algunas clasificaciones viales el modelo característico para cada uno de los casos propuestos. En base a los talleres de identificaron 8 casos específicos para las centroamericanas y nacionales que fueron definidas según los modelos base.

La serie 4 se define basado en el análisis de los flujos de exportación del país de productos tradicionales que son transportados a los dos puertos principales, Puerto de Santo Tomas de Castilla y Puerto Quetzal, la siguiente figura muestra los flujos principales entre pares O/D para los productos tradicionales.

Exportaciones*		
(cifras 2006)	Valor (USD)	Peso (Tons.)
Total	\$5.943.304.028	7.192.966
Tipo de producto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 22% - Tradicionales ▪ 78% - No Tradicionales 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 47% - Tradicionales ▪ 53% - No Tradicionales
% Participación por Modo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 7,4% Aéreo ▪ 60,7% Marítimo ▪ 32,0% Terrestre 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,6% Aéreo ▪ 67,8% Marítimo ▪ 31,6% Terrestre

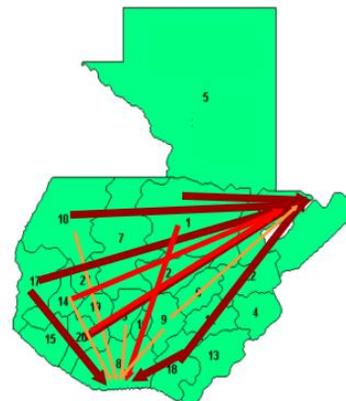


Figura 2-2 Ejemplo de Curva Capacidad/Velocidad en HDM-4
Fuente: Plan multimodal de obras de infraestructura (2007)

Por otro lado, la serie 5 fue propuesta en base al Plan multimodal de obras de infraestructura (2007), donde se identificó que los principales puntos de entrada de los turistas están representados por La Aurora y por la frontera con El Salvador, los cuales concentran el 81% del tráfico que llega al país. En la siguiente figura se nota claramente como el principal flujo este concentrado entre la frontera de El Salvador y la región central del país, asimismo la región de Tikal tiene un flujo importante de turistas.

Flujos principales de Turistas		
Origen	Destino	Total
Frontera Salvador	Ciudad de Guatemala	184.448
La Aurora	Ciudad de Guatemala	141.005
Frontera Salvador	Antigua Guatemala	111.986
La Aurora	Antigua Guatemala	85.610
Frontera Salvador	Atitlán	79.049
La Aurora	Atitlán	60.431
Frontera Salvador	Tikal Peten	59.287
La Aurora	Tikal Peten	45.323

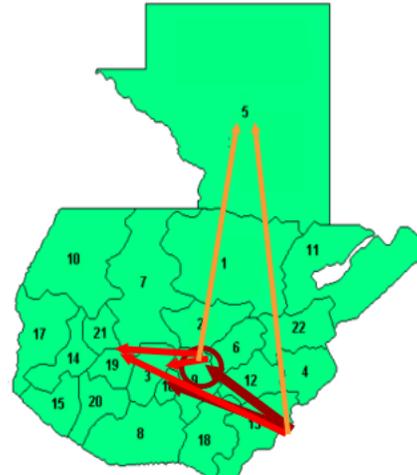


Figura 2-3 Ejemplo de Curva Capacidad/Velocidad en HDM-4
Fuente: Plan multimodal de obras de infraestructura (2007)

A continuación, se lista los modelos de las series adicionales propuestas y su respectiva descripción, el primer número identifica la serie y el Segundo número el modelo que se tomó de base de los 7 modelos principales:

8. 2M1 Centroamericana- S-N-Oc (constante)
9. 2M2 Centroamericana Or-Oc (interurbano)
10. 2M3 Centroamericana Oc-S (interurbano)
11. 2M6 Centroamericana S-N-Or (constante)
12. 3M1 Nacional N-S-Or (constante)
13. 3M2 Nacional Oc-Or (interurbano)
14. 3M3 Nacional S (Interurbano)
15. 3M5 Nacional N-Oc (estacional)
16. 4M1 CA - Export. Trad. - PSTC
17. 4M2 CA - Export. Trad - PQ
18. 5M2 CA Turismo C-Or
19. 5M5 CA Turismo C-N

2.2 Relaciones de Velocidad y Capacidad

La modelación de la función entre el flujo vehicular y la velocidad de operación de estos, depende de las características geométricas de la vía, de la intensidad del flujo y de la función misma de la vía.

Para modelar los efectos de la congestión, el flujo de tránsito debe ser convertido en vehículos equivalentes estandarizados. Esta conversión se basa en el concepto de **“espacios equivalentes de un automóvil de pasajeros”** (PCSE), el cual toma en cuenta el espacio relativo que tiene un vehículo de pasajeros y los vehículos pesados son transformado en su equivalente al espacio que ocuparía un vehículo liviano. Cabe señalar que aunque HDM-4, estandarice el

tamaño de los vehículos a vehículos livianos, HDM-4 considera las diferencias de velocidades que experimentan los diferentes vehículos implicados en el tráfico.

Curva Velocidad y Capacidad: Se puede describir de manera muy genérica, que a medida que el flujo de vehículos aumenta, la velocidad promedio de todos los vehículos converge hacia la velocidad de los vehículos más lentos del flujo, pasando a ser cada vez más restringida la circulación de los móviles. Cuando el flujo se encuentra próximo a la capacidad última, la velocidad promedio cae por debajo de la que sería la velocidad a la cual se moverían los vehículos más lentos. A manera de ejemplo en la siguiente figura, se presenta el modelo tipo de capacidad/velocidad que determina HDM-4.

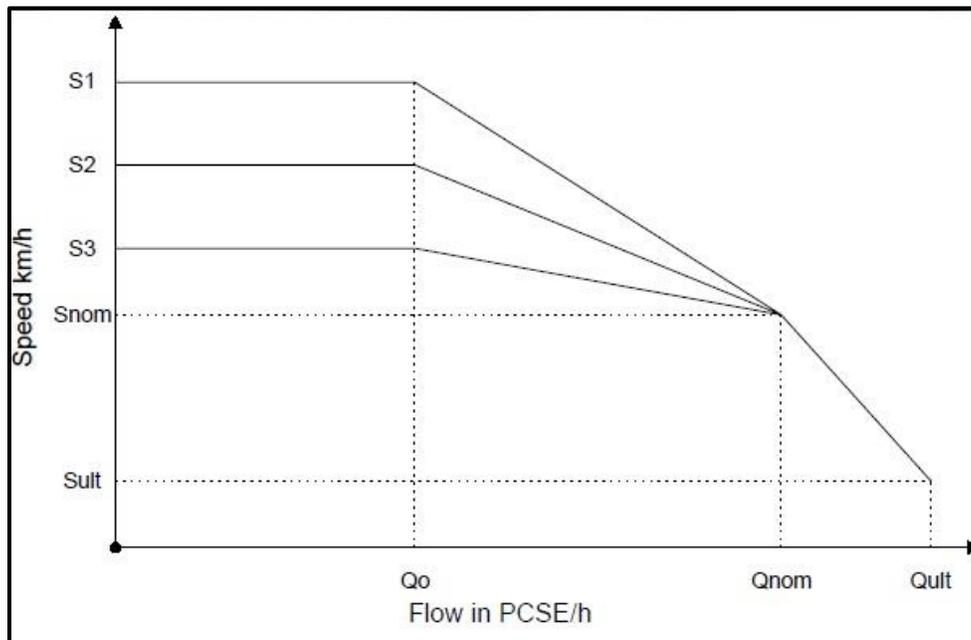


Figura 2-4 Ejemplo de Curva Capacidad/Velocidad en HDM-4

Fuente: The Highway Development and Management Series, Volumen 4 (Kerali, 2001)

La importancia del modelo de velocidad y capacidad, en el software, se debe a que es necesario para analizar los efectos del volumen de tráfico en la velocidad, cuyo fin es determinar las consecuencias económicas de hacer mejoras a la capacidad de la ruta misma. Los factores que determinan la relación entre flujo y capacidad son:

- ✓ Capacidad a flujo Libre (Q_0): Flujo en el que el conductor puede elegir con libertad la velocidad de circulación. Si el flujo vehicular supera al valor del flujo libre, la velocidad de circulación disminuye progresivamente de acuerdo a las condiciones de la congestión.
- ✓ Capacidad Nominal (Q_{nom}): Valor del flujo en el que la circulación de todos los vehículos, tienden a ser igual a la velocidad del vehículo más lento.
- ✓ Capacidad ultima (Q_{ult}): Corresponde al máximo número de vehículos livianos equivalentes (PCSE) que pueden pasar por un punto, o sección transversal del camino, en una hora. El valor de la capacidad determina la forma curva de flujo/velocidad, al establecer el valor de la **capacidad última** (Q_{ult}).

- ✓ **Velocidad última (Sult):** Es la velocidad a la cual se moverían todos los vehículos una vez alcanzan la capacidad ultima.
- ✓ **Velocidad Libre:** Es la velocidad de cada vehículo cuando el flujo se encuentra muy cercano a cero. Si bien no se encuentra afectada por la condición del tránsito, si es influenciada por las características físicas del camino y otros factores externos al tránsito. Las velocidades de flujo libre son alimentadas en cada uno de los tipos de vehículos en el módulo de flota vehicular, es decir cuando se configura los vehículos que conforman una flota se definen las velocidades de flujo libre (S_i) de cada uno de ellos.

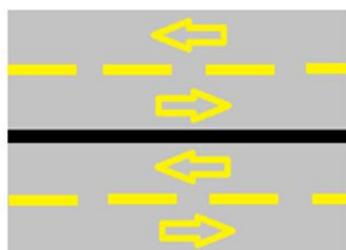
2.2.1 Modelos de Capacidad/Velocidad Manual de Carreteras

Según el inventario físico de carreteras realizado por el Instituto Geográfico Nacional, la red vial de Guatemala cuenta dentro de su clasificación con Carreteras Centroamericanas, nacionales, departamentales y caminos rurales, en la Figura 2-5 se evidencia el tipo de vía que caracteriza cada una de las rutas según su clasificación vial.

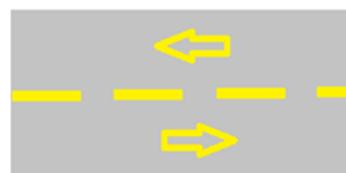
SIGNOS CONVENCIONALES		
CARRETERA ASFALTADA (4 CARRILES)		
CARRETERA PAVIMENTADA (4 CARRILES)		CARRETERAS CENTROAMERICANAS
CARRETERA ASFALTADA (2 CARRILES)		CARRETERAS NACIONALES
CARRETERA PAVIMENTADA (2 CARRILES)		CARRETERAS DEPARTAMENTALES
CARRETERA DE TERRACERIA		
CAMINOS RURALES		CAMINOS RURALES

Figura 2-5 Tipología de carreteras para la clasificación vial de Guatemala
Fuente: Mapa red vial de Guatemala (IGN, 2022)

En la Figura 2-6 se presentan los esquemas de los tipos de vías que se consideran se pueden encontrar en la configuración vial de la red vial de Guatemala.



Cuatro carriles



Dos carriles anchos

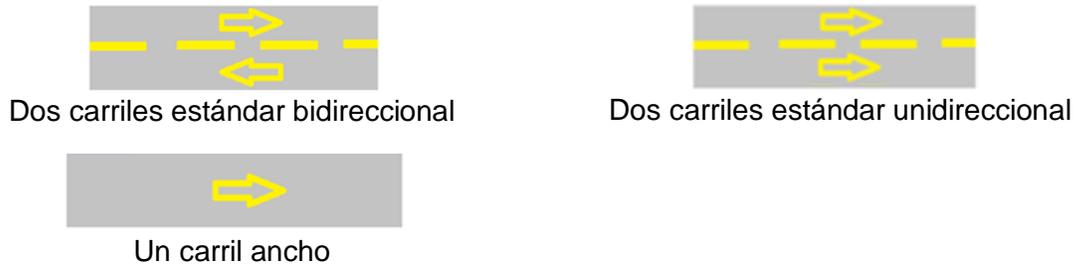


Figura 2-6 Esquemas de tipos de carreteras para la clasificación vial de Guatemala
Fuente: Elaboración propia

Basado en lo anterior, se definen ocho modelos de capacidad /velocidad para los diferentes tipos de vías que pueden presentarse en Guatemala, en la Tabla 2-2 se muestran los valores adaptados para los parámetros que definen el modelo. Cabe resaltar que debido a la falta de información referente a las condiciones reales de Guatemala se han tomado valores referenciales que se ajustan a las características de tipos de vías propuestas. Por lo tanto, dichos valores pueden ser actualizados tomando como base estudios específicos realizados a las condiciones de Guatemala.

El modelo 2 es el caso por default que debiera utilizarse en caso tal no exista información consistente respecto del proyecto a evaluar. Por otro lado, la capacidad de las vías se ve afectada por el trazado horizontal y vertical de la carretera, que representa un factor influyente en la velocidad de operación y la oportunidad de adelantamiento que tiene el usuario según el trazado de la vía. Por tal motivo, se plantea el modelo 6 y 7 que permite diferenciar entre carreteras de geometría ondulada y de alta montaña, las cuales generan una diferencia significativa en la capacidad y nivel de servicio de la vía.

Tabla 2-2 Modelos generales de capacidad /velocidad en HDM-4 para Guatemala

Modelo	Qo	Qnom	Qult	Sult
	(PCU/h)/pista			km/h
01-Carretera Unidireccional (un carril)	0	420	600	10
02-Carretera 2 carriles estándar (Default)	140	1260	1400	25
03-Carretera bidireccional (ancha)	320	1440	1600	30
04-Carretera 2 carriles unidireccional	800	1900	2000	40
05-Carretera 4 carriles (2 carriles por sentido)	800	1900	2000	40
06-Carretera de dos carriles Trazado Ondulado	100	1080	1200	20
07-Carretera 2 Carriles Trazado Alta Montaña	70	810	900	15
08-Carretera 6 carriles (3 carriles por sentido)	1200	2050	2200	40

2.3 Zonas Climáticas

Dentro de los varios factores que afectan a los deterioros y a los modelos de predicción asociados a ellos, se encuentra el factor climático. De acuerdo a HDM-4, los climas prevalecientes de determinada zona se pueden clasificar de acuerdo a dos criterios: clasificación humedad y clasificación de temperatura. El HDM-4 presenta valores precargados característicos para cada

tipo de clima y humedad, los cuales pueden ser tomados como base en caso tal no se cuente con información consistente de alguna zona a evaluar. De acuerdo a la Tabla 2-3, la clasificación de Humedad es la siguiente:

Tabla 2-3 Clasificación de Humedad en HDM-4

Clasificación de Humedad	Descripción	Índice de Humedad Thornthwaite	Precipitación Anual (mm)
Árido	Muy poca lluvia, gran evaporación	-100 a -61	< 300
Semiárido	Poca lluvia	-60 a -21	300 a 800
Subhúmedo	Lluvia moderada, o fuertes lluvias estacionales	-20 a 19	800 a 1600
Húmedo	Moderadamente caluroso con lluvia estacional	20 a 100	1500 a 3000
Perhúmedo	Grandes lluvias, o muchos días de suelo saturado	> 100	> 2400

Fuente: The Highway Development and Management Series, Volumen 4 (Kerali, 2001)

A la vez, la clasificación según los rangos de temperaturas en los cuales se encuentra la zona a modelar se rige de acuerdo con los valores entregados en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Clasificación de Temperatura en HDM-4

Clasificación de Temperatura	Descripción	Rango de Temperatura (°C)
Tropical	Caluroso con un pequeño rango de variación de temperatura	20 a 35
Subtropical - Cálido	Días con altas temperaturas y noches con temperaturas frías, estaciones calurosas y heladas	-5 a 45
Subtropical - Fresco	Días con temperaturas moderadas, inviernos fríos	-10 a 30
Templado - Frío	Verano caluroso, inviernos con heladas superficiales	-20 a 25
Templado - con Heladas	Verano frío, invierno con heladas profundas	-40 a 20

Fuente: The Highway Development and Management Series, Volumen 4 (Kerali, 2001)

En lo que, respecto al dato específico de cantidad de agua caída, este es ingresado como **precipitación media mensual**, expresado en términos de mm/mes.

Es importante comprender que en muchas zonas del país el índice de humedad no es constante durante todo el año. Si bien es cierto el **Índice de Humedad** es capaz de darnos un indicador del grado de saturación o sequedad del suelo de cierto lugar, este no entrega las variaciones estacionales que se puedan dar dentro de un mismo año. Por ello en HDM-4, se establece el concepto de “**duración de la estación seca**”, el cual permite considerar los cambios estacionales de humedad.

En lo que respecta a la categorización por temperatura, aparte de la **temperatura media** del lugar existen otros datos a tener en cuenta.

Índice de congelamiento:

Se define como la diferencia entre la temperatura media del ambiente y los 0°C. El índice de congelamiento es negativo cuando la temperatura del ambiente es menor a los 0°C y positiva en caso contrario.

El índice de congelamiento se calcula como:

$$FI = \sum_{i=1}^{ndías} ABS[MIN(TEMP, 0)] \quad \text{(Ecuación 2-1)}$$

Donde:

Fi: Índice de Congelamiento
TEMP: Temperatura (°C)
Ndías: Números de días con una temporada de congelamiento

El índice de congelamiento es usado para la modelación del comportamiento de los pavimentos rígidos.

Rango de Temperaturas:

Corresponde a la media del rango de temperatura mensual. El cálculo está basado en el rango de temperatura para cada uno de los 12 meses del año, por lo tanto es la diferencia entre la máxima y mínima temperatura de cada mes. Los 12 valores obtenidos son promediados dando origen al rango de temperaturas, el cual es usado en la modelación de los pavimentos de hormigón.

Días con Temperaturas mayores a 32°C:

El número de días, dentro de un año, cuya temperatura ambiental excede a los 32 °C es denotada como **Días con T>32°C**. Esta variable es requerida para la modelación del comportamiento de los pavimentos de hormigón.

2.3.1 Clasificación Climatológica Sugerida para Guatemala

El proceso de selección del tipo de clima para la utilización de HDM-4, se realizó bajo el análisis de diferentes parámetros tales como: localización, clima, precipitación e índice de humedad de los 22 departamentos pertenecientes a Guatemala. Se ha dividido en seis zonas las cuales se consideran podrían ser representativas de Guatemala, cada zona se define por un nombre y unas características climatológicas que serían las que se considerarían para la configuración del HDM4 para cada zona propuesta.

En la Tabla 2-5 se presentan las 6 regiones relacionando el conjunto de departamentos que representaría cada una de las regiones propuestas.

Tabla 2-5 Propuestas de clasificación regional para uso exclusivo de la configuración del HDM4 a las condiciones locales de Guatemala

Región 1 Centro	Región 2 Oriente	Región 3 Occidente	Región 4 Sur	Región 5 Norte Bajo	Región 6 Norte Alto
Guatemala Sacatepequez	El Progreso Jalapa Jutiapa Chiquimula Zacapa Izabal	Huehuetenango Totonicapán Sololá Quetzaltenango Chimaltenago San Marcos	Suchitepequez Retalhuleu Santa Rosa Escuintla	Quiché Alta Verapaz Baja Verapaz	Petén

En las Tabla 2-6 y Tabla 2-7, se entregan los parámetros que vendrían a definir la clasificación por humedad y temperatura, para las respectivas zonas climáticas en Guatemala.

Tabla 2-6 Clasificación por Humedad para Guatemala

Zona	Clasificación de Humedad	Índice de Humedad	Duración de estación seca en meses	Precipitación Media Mensual (mm)
Zona Centro de Guatemala	Subhúmedo	0	4.5	133
Zona Oriente_ húmedo de Guatemala	Húmedo	60	5	250
Zona Oriente_ semiárido de Guatemala	Semiárido	-40	5	66
Zona Occidente de Guatemala	Húmedo	60	5.5	250
Zona Sur de Guatemala	Perhúmedo	100	3	450
Zona Norte Bajo de Guatemala	Húmedo	60	6	250
Zona Norte Alto de Guatemala	Perhúmedo	100	6	270

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2-7 Clasificación por Temperatura para Guatemala

Zona	Clasificación de Temperatura	Temperatura Media Anual (°C)	Rango Promedio de Temperaturas (°C)	Días con T > 32°C	Índice de Congelamiento [°C x días]
Zona Centro de Guatemala	Templado-frío	20	12	10	0
Zona Oriente_ húmedo de Guatemala	Tropical	23	11	10	0
Zona Oriente_ semiárido de Guatemala	Tropical	23	11	30	0
Zona Occidente de Guatemala	Templado-frío	11	10	0	0
Zona Sur de Guatemala	Tropical	25	12	75	0
Zona Norte Bajo de Guatemala	Sub tropical-cálido	23	13	10	0
Zona Norte Alto de Guatemala	Tropical	24	5	0	0

Fuente: Elaboración Propia

Los valores propuestos fueron determinados de acuerdo a estadísticas históricas de Meteorología de Guatemala (precipitaciones, rango de temperaturas, estación seca y temperatura media), promediando las respectivas estaciones meteorológicas representativas de las regiones

planteadas, los datos fueron tomados de la página oficial del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH).

En lo que respecta al valor de temperatura para cada región, se realizó la recolección de los valores promedios de cada departamento de la página oficial del INSIVUMEH para luego ser promediados para cada zona específica.

La clasificación de humedad fue relacionada según el mapa de línea base de aridez (Castellanos, et al., 2018) que se presenta en la Figura 2-7, basada en las zonas de las regiones propuestas anteriormente. En este caso al notar una diferencia en algunos departamentos de la región oriente, se procedió a subdividir la zona en oriente húmedo y oriente semiárido, donde los departamentos el Progreso y Zacapa, serían los pertenecientes a la zona semiárida.

La duración de estación seca para cada zona se define teniendo como base los mapas presentados en la Figura 2-8 donde me indica las fechas de inicio y fin de la época lluviosa para las diferentes zonas de Guatemala. Basado en lo anterior se busca una fecha de inicio y fin según las seis zonas propuestas y se define los meses de duración de la estación seca.

Cabe señalar que el porcentaje de tiempo de conducción de las carreteras cubierta por aguas y nieve, para las zonas se propone el valor de 0%. Ya que se considera esta situación no se presenta en las condiciones viales de Guatemala.



Figura 2-7 Mapa de línea base de aridez de Guatemala
Fuente: (Castellanos, et al., 2018)

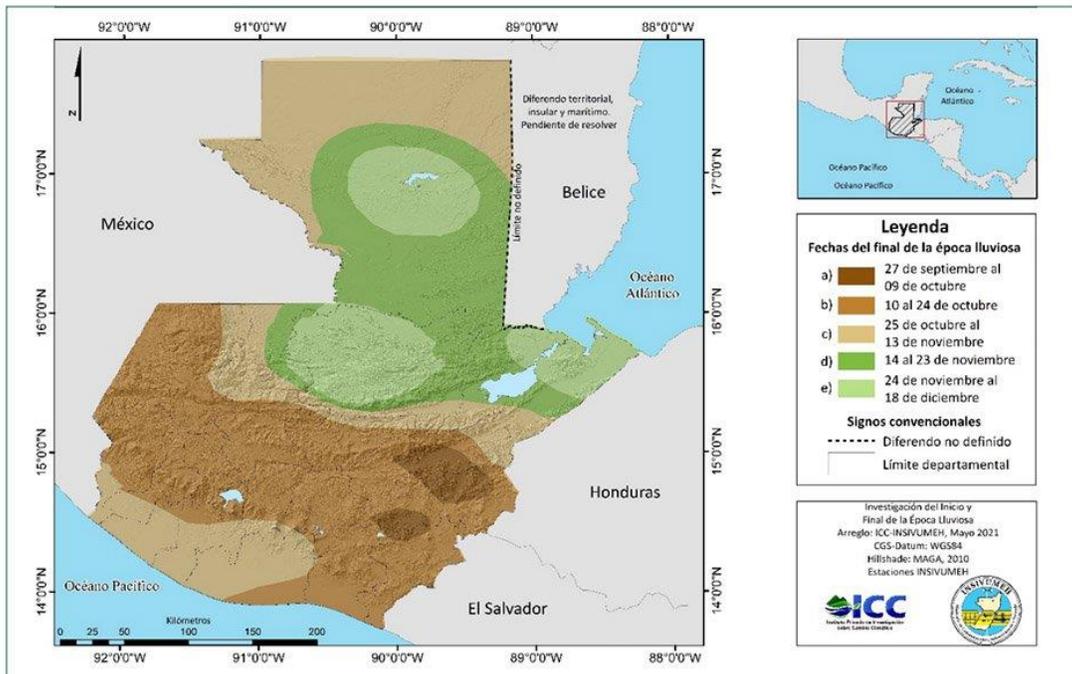
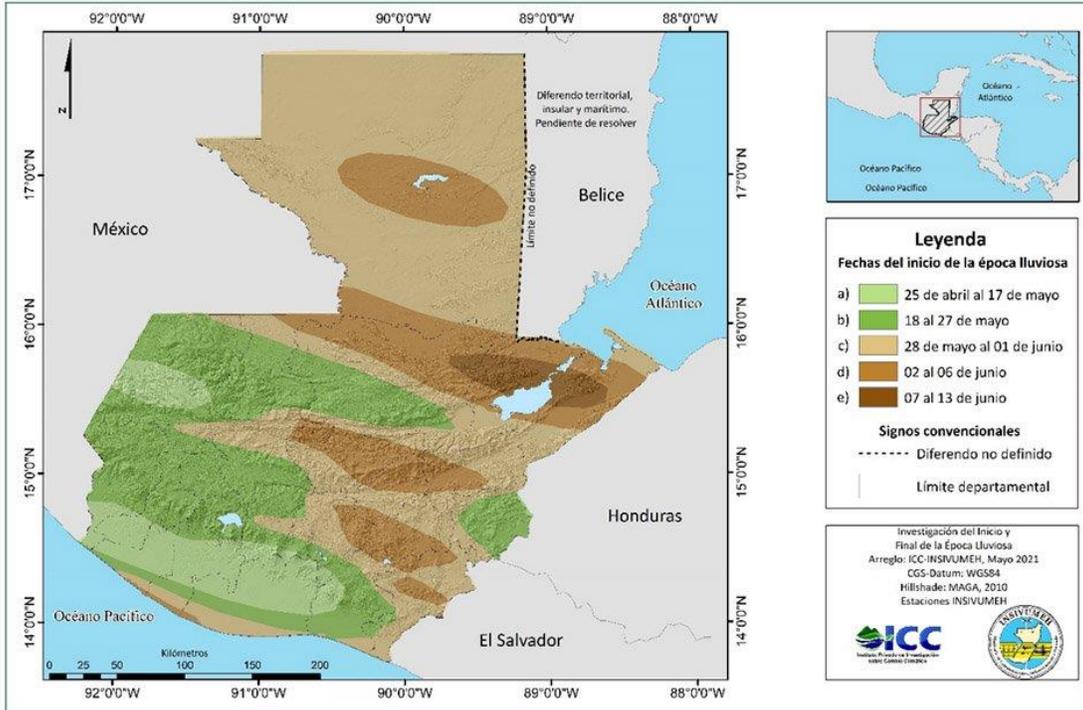


Figura 2-8 Valores promedio del inicio y final de la época lluviosa en Guatemala
 Fuente: (Orrego León, et al., 2021)

2.4 Datos y Tablas Agregadas

La estructura de HDM-4 está compuesta por 3 herramientas de análisis (Estrategia, Programa y Proyectos) y 4 gestores de datos: Configuración del HDM-4, Flota vehicular, Red de carreteras y Estándares de trabajo.

En el módulo de configuración se establecen aquellos datos que por defectos se utilizarán en HDM-4. En la flota vehicular se ingresan las características necesarias para calcular velocidades de operación, costos vehiculares y datos de los vehículos que permiten estimar el deterioro de los pavimentos. Por otra parte, en los estándares de trabajo se incorporan en el software, los objetivos, condiciones y respuestas que se esperan conseguir en la gestión de la carretera. Por último, en la red de carreteras se proporcionan las funciones básicas que describen las características de los tramos de la carretera.

Como en el módulo de configuración, se pueden ingresar los valores que por defecto tendrá el programa, una de esas atribuciones es poder describir diversos parámetros de manera cualitativa (bueno, regular, malo) asignándoles un valor representativo para la respectiva cualidad. Estos datos pueden tener diversos valores de acuerdo a la definición y/o condiciones prevalecientes del país. Pudiendo ser editados, e incluso aumentando la cantidad de cualidades, en la sección **Tablas Agregadas de tramo**. En la sección **Datos agregados del tramo**, los valores previamente ajustados, son asignados por defecto a los respectivos tramos de la red de carretera. A pesar que aquellos valores podrán ser asignados por defecto, estos siempre se podrán modificar en el tramo de la respectiva red.

Los datos a categorizar cualitativamente en esta sección son los siguientes:

- ✓ Volumen del tráfico (veh/día)
- ✓ Capas Asfálticas (Espesores de la base y capas asfálticas, en mm)
- ✓ Tipo de geometría (ascensos y descensos, curvatura horizontal, pendiente)
- ✓ Calidad de compactación (%)
- ✓ Adecuación Estructural (SNP, Módulos de Ruptura, Espesor de Losas)
- ✓ Calidad de la rodadura (IRI, en mm/km)
- ✓ Condición superficial (Agrietamiento %, Desprendimiento %, Profundidad de Ahuellamiento, n° de Baches, Rotura de Borde, Escalonamiento, Despostillamiento de Juntas %)
- ✓ Textura superficial (Profundidad macrotextura y resistencia al deslizamiento)

2.4.1 Datos y Tablas Agregadas preasignadas para Guatemala

2.4.1.1 Volumen de Tránsito

La utilización de las vías (autopistas, autorrutas, colectoras, etc.) pueden ser descritas o seleccionadas de acuerdo al TMDA que circulará por ella, la cual se presenta en la Tabla 2-8.

Los valores ingresados para la categorización del TMDA de las vías pavimentadas (asfalto u hormigón) y no pavimentadas fueron asignados según algunas fuentes referenciales, tales como: el Manual Centroamericano de diseño de pavimentos (Iturbide, 2002) tomando como base la clasificación funcional de las carreteras regionales y volúmenes de tránsito presentados; y los criterios de diseño tomados del Plan de Desarrollo Vial (Mcrit & Disystems, 2018).

Adicionalmente, dichos valores fueron presentados en las mesas de trabajo para la validación de las mismas según la experticia de los participantes.

Tabla 2-8 Tabla Agregada TMDA Guatemala

Nivel de Tránsito	TMDA según Rodadura	
	Asfáltico/Hormigón	No Pav.
Muy Bajo	1000	200
Bajo	5000	500
Medio	10000	1000
Alto	20000	2000
Muy Alto	50000	3000

Fuente: Elaboración Propia

2.4.1.2 Calidad de Compactación

En base a lo expresado en la sección 401 de las Especificaciones generales para construcción de Carreteras y puentes (CAMINOS, 2002), la densidad de compactación de las mezclas superpave de todos los pavimentos asfálticos en Guatemala debe ser superior al 96%. Adicionalmente para la aceptación de mezclas tradicionales se establece una tolerancia de un 1%, basado en la tolerancia de aceptación se definen los valores según la calidad de compactación que se presentan en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9 Calidad de Compactación de las Mezclas Asfálticas

Calidad de Compactación	Compactación relativa [%]
Buena	96
Regular	91
Mala	85

Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 5 (MOP, 2016)

2.4.1.3 Deterioros Superficiales

A continuación, se presenta la descripción de los tipos de deterioros utilizados en HDM4, para la descripción del estado de los pavimentos asfálticos:

Agrietamiento Estructural Total: Este tipo de agrietamiento es un deterioro del tipo estructural que presenta un desarrollo progresivo. En su fase inicial se presenta en grietas longitudinales, que en la etapa intermedia se interconectan con otras grietas, formando lo que se conoce como “piel de cocodrilo”. El agrietamiento se presenta principalmente en las zonas del pavimento donde se reciben las mayores cargas. Involucra tanto a grietas estructurales angostas como anchas. En HDM-4, son modelados como porcentaje de área deteriorada sobre el total de pavimentada.

Agrietamiento Estructural Ancho: Se define de la misma manera que el agrietamiento estructural total, sin embargo, solamente involucra a aquellas grietas cuyo ancho sobrepase los 3 mm. Por ende, involucraría a aquellas grietas que se encuentran en una etapa avanzada de aumento del deterioro. En HDM-4, son modelados como porcentaje de área deteriorada sobre el total de pavimentada.

Agrietamiento Térmico: Se presentan en la vía como grietas perpendiculares al eje de la vía, las cuales se encuentran regularmente espaciadas. Son provocadas por los gradientes térmicos, en especial en mezcla rigidizadas. En HDM-4, son modelados como porcentaje de área deteriorada sobre el total de pavimentada.

Desprendimiento de Áridos: Es el desprendimiento del mortero asfáltico, cuya consecuencia es la exposición del agregado grueso que compone la mezcla asfáltica. En HDM-4, son modelados como porcentaje de área deteriorada sobre el total de pavimentada.

Baches: Cavidad formada por desprendimiento de la mezcla asfáltica. Pudiendo extenderse a las capas inferiores del pavimento. Un bache en HDM-4, corresponde a un bache de área de 0,1 m² y de 100 mm de profundidad.

Rotura de Borde: Se define como la pérdida de superficie, y posiblemente de materiales de la base, del borde del pavimento. Comúnmente se producen en caminos que no contienen bermas. La medición se obtiene al medir el área del cuadrilátero que rodea a la rotura en metro cuadrados. Para ser ingresado en HDM – 4, la rotura debe ser expresada en términos de m²/Km

Ahuellamiento: Deterioro que se puede presentar en cualquiera de las capas del pavimento flexible, que se manifiesta en un hundimiento longitudinal que coincide con la huella de los vehículos. En HDM-4, el ahuellamiento es modelado en términos de milímetros y son medidos en terreno con la regla móvil de 2 metros.

En lo que respecta a los deterioros de los pavimentos de hormigón, HDM-4, los describe con los siguientes deterioros:

Agrietamiento Transversal: Grietas que forman un ángulo recto al eje de la vía, producidas principalmente por un espesor insuficiente para soportar las cargas o losas de largo excesivo. En HDM – 4, se modelan como porcentaje de losas agrietadas.

Escalonamiento: Desnivel entre dos superficies de hormigón adyacentes, que se encuentran separadas por una junta transversal o grieta. Son medidas en milímetros con una regla que mide el desnivel entre dos losas contiguas.

Despostillamiento de Juntas: Desintegración de la junta, ya sea longitudinal o transversal, que ocasiona pérdida de hormigón. Puede afectar hasta 50 [cm] dentro de la losa. Son medidas en términos de porcentaje de losas afectadas por este deterioro.

En HDM-4, se debe describir con valores representativos de deterioros, la calidad del pavimento, por ende para determinar los niveles de severidad que describan la calidad de este, se consulta a los estándares descritos en el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras (CEPRENAC, 2010). Tal sea de caso de describir un pavimento asfáltico en estado regular, se describan con valores representativos del agrietamiento, desprendimiento, baches, ahuellamiento y rotura de borde.

Según lo expresado por el Manual Centroamericano el área agrietada total más las áreas bachadas de cualquier segmento de un tramo vial, no debe exceder el 20% del área total del

proyecto. En caso de que se exceda ese 20%, debe aplicarse una protección adecuada a entero cargo y costo del contratista. Por ello, tanto al desprendimiento de áridos como al agrietamiento estructural total, se consideró un 20% de área total dañada como un evento muy malo, y de ahí se asignaron valores inferiores a 20% a las características de malo y regular. Los valores de agrietamiento estructural ancho se utilizaron como criterio de asignación del valor del agrietamiento estructural total menos el 5%.

En el agrietamiento térmico se determina como valor cuantitativo, el valor nulo para todas las categorías, dado que internamente HDM-4 solo modela agrietamiento térmico para temperaturas temperadas – frías, a la vez de zonas subtropicales cálidas con índices de húmedas características de zonas áridas y semiáridas. En síntesis, HDM-4, modela agrietamiento térmico para solo 6 de 25 condiciones climáticas posibles, o sea el 24% de los casos posibles. En adición, el máximo valor de agrietamiento térmico que modela HDM-4, para las zonas que presentan este tipo de daño, es del 5% del área total.

A la vez, un ahuellamiento de severidad alta es aquel que es mayor a los 25 mm (CEPREDENAC, 2010) , en consecuencia, el valor de 25 mm es seleccionado para describir la categoría de “muy malo” para un pavimento. La severidad media, se encuentra cuando el pavimento tiene un ahuellamiento comprendido entre los 10 a 25 mm, entonces se seleccionó el valor de 10 mm para describir un pavimento “regular”. La severidad baja, en el ahuellamiento, se obtiene cuando el valor es inferior a los 10 mm, por ende, se seleccionó como valor de 2 mm, para la representación de un pavimento “bueno”.

Con la información descrita en los párrafos anteriores, se procede a sugerir la descripción de los deterioros de los pavimentos asfálticos, indicada en la Tabla 2-10. Cabe señalar que los valores de baches y rotura de borde son los valores que trae por defecto el programa. Por otra parte, el nivel nuevo con el bueno se diferencia exclusivamente, porque el ahuellamiento es un deterioro que aparece en edades tempranas y en aquellas edades no debiesen encontrarse grietas.

Tabla 2-10 Descripción del Deterioro Superficial Pavimento Asfáltico

	Agriet. Est. Tot. (%)	Agriet. Est. Anc. (%)	Área con Desprendimiento (%)	Nº de Baches por Km *	Rotura de borde (m2 por km)	Profundidad de rodera (Ahuellamiento) (mm)
Nuevo	0	0	0	0	0	0
Bueno	0	0	1	0	0	2
Regular	5	0	10	0	10	10
Malo	15	9.5	20	5	100	15
Muy Malo	20	15	30	50	300	25

Fuente: Elaboración Propia

Nota: * Un bache estándar en HDM-4, corresponde a un bache de área de 0,1 m² y de 100 mm de profundidad.

Con respecto a la descripción cualitativa del estado del pavimento rígido, lo que respecta al escalonamiento, según señala el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras el pavimento de concreto hidráulico no debe presentar losas con diferencias de nivel mayores a 5mm, por ende se selecciona aquel valor para un pavimento con un escalonamiento malo. Para cuando el escalonamiento se encuentra entre 5 – 10 mm, el pavimento tiene una severidad alta,

en consecuencia para describir un estado muy malo se selecciona un valor representativo de 8 mm. Cuando el escalonamiento es inferior a los 5 mm, se habla de una severidad baja del escalonamiento, entonces para representar un estado regular del pavimento al escalonamiento, el valor es de 3 mm. En lo que refiere a la categorización muy bueno y bueno, estos tendrán valores de 0 o 1 mm, de escalonamiento.

Los valores de agrietamiento transversal y despostillamiento de juntas, son valores sugeridos a nivel general teniendo en cuenta distintas referencias internacionales y la experiencia del consultor.

En la Tabla 2-11, se muestra la síntesis de los valores seleccionados para describir los deterioros superficiales de un pavimento rígido.

Tabla 2-11 Descripción del Deterioro Superficial Pavimento de Hormigón

	Agrietamiento Transversal (%)	Despostillamiento de juntas (%)	Escalonamiento (mm)
Nuevo	0	0	0
Bueno	5	0	1
Regular	20	10	3
Malo	30	20	5
Muy Malo	50	20	8

Fuente: Elaboración Propia

Es importante señalar que en aquellas ocasiones en las cuales se encuentren estudios de auscultación de pavimentos, cuyos datos de deterioros se condicen con lo observado en terreno, son aquellos datos los que deben de ser utilizados para describir las características de la ruta. Si no existen aquellos datos, se asignarán los valores que por defecto, describirán a la categorización cualitativa del estado del pavimento.

2.4.1.4 Capas Asfálticas

Los pavimentos asfálticos, están compuestos por una capa de rodadura de materiales ligados (carpeta asfáltica, carpeta intermedia o binder, base asfáltica) y capas de materiales no ligados (bases granulares o estabilizadas y subbase).

La resistencia de los pavimentos asfálticos, a las solicitaciones del tránsito, viene dado por el número estructural que este contenga. Donde cada capa del pavimento resiste a las solicitaciones del tránsito en función del espesor de la respectiva capa y su coeficiente estructural. La suma de cada una de las capacidades resistentes, de las capas que contengan el pavimento, entrega lo que es el número estructural.

En HDM-4, la capacidad resistente de un pavimento asfáltico no solamente se refleja por el número estructural, sino que también considera el aporte estructural que entrega la capacidad de la subrasante, dando origen al concepto de número estructural ajustado (SNP).

De acuerdo al Manual de Centroamericano para diseño de pavimentos (Iturbide, 2002) tabla 7-2 (espesores mínimos sugeridos), el mínimo espesor de base granular permitido en los pavimentos asfálticos, es de 150 mm. Eso implica que es habitual encontrar en Guatemala, espesores de 150 mm, tanto para la base granular como para la subbase.

Como en HDM-4, se debe ingresar pavimentos con espesores tipos que se encuentran en Guatemala, en la Tabla 2-12, se muestran los valores a utilizar por defecto de acuerdo al respectivo SNP de la estructura. Estos valores son representativos del inventario vial de la red nacional y de acuerdo al autor del presente estudio, son los que por diseño debiesen de encontrarse en terreno.

Tabla 2-12 Espesores de Capas de un Pavimento Asfáltico

	Espesor Superficial (mm)		Espesor de la Base (mm)
	Nuevo	Anterior	
SNP < 3	50	50	150
3 < SNP < 4	100	50	200
4 < SNP < 5	100	100	200
SNP > 5	150	100	250

Fuente: Elaboración Propia

2.4.1.5 Resistencia del Pavimento

La resistencia de los pavimentos depende casi exclusivamente del volumen de tránsito que circule por la vía. Por ejemplo, si se diseña un pavimento asfáltico, en el cual los estudios indicaban cierto TMDA inicial con una tasa de crecimiento, pero resulta que al ser pavimentada la vía el TMDA sube abruptamente y de manera exponencial en el tiempo. Inicialmente podríamos advertir que la adecuación estructural de la vía al nivel de tránsito era la correcta, sin embargo el tránsito que no fue considerado en los estudios implicaría que la estructura no está debidamente adecuada a resistir un mayor nivel de tránsito, consumiéndose antes de tiempo la vida útil.

Es así como podemos encontrar situaciones en la realidad, donde la capacidad resistente de la estructura del pavimento no es la adecuada al volumen de tránsito que circula por el tramo. Para HDM-4, es posible describir un cierto nivel representativo que interprete la situación descrita y en la Tabla 2-13, se presentan los niveles de adecuación estructural de los pavimentos asfálticos, en base los valores sugeridos por los especialistas presentes en las mesas de trabajo y la experiencia del consultor.

Tabla 2-13 Adecuación Estructural de los Pavimentos Asfálticos

Adecuación estructural	Asfáltico SNP				
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Malo	1.8	1.8	3.5	3.0	4.0
Regular	2.0	3.0	4.0	4.5	5.0
Bueno	2.5	3.5	4.5	5.0	6.0

Fuente: Elaboración Propia

Un pavimento rígido difiere en su desempeño estructural del pavimento asfáltico, en que el pavimento rígido responde a las solicitaciones del tránsito como un elemento placa, en el cual la losa de hormigón es la que soporta casi la totalidad de los esfuerzos. La subbase y subrasante, del pavimento rígido, tiene un comportamiento como si fuese una cama de resortes y recibe pequeños esfuerzos de transferencia. Es ahí, que para describir la capacidad estructural de un pavimento rígido, principalmente se necesitan como parámetros el espesor de la losa y el módulo de ruptura.

De acuerdo a los valores sugeridos por los especialistas presentes en las mesas de trabajo, referencias internacionales y experiencia del consultor. En la Tabla 2-14, se presentan las resistencias de los pavimentos rígidos de acuerdo a la adecuación al volumen de tránsito.

Tabla 2-14 Adecuación Estructural de los Pavimentos de Hormigón

Adecuación estructural	Módulo de Ruptura [MPa]	Espesor Losa JPCP (mm)				
		Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Malo	4,0	140	140	160	180	200
Regular	4,5	150	160	190	210	320
Bueno	5,0	170	170	200	230	250

Fuente: Talleres de las mesas de trabajo de Configuración y parametrización del HDM-4 de las condiciones de Guatemala

Finalmente, en los caminos no pavimentados la adecuación estructural queda determinada por el espesor remanente de la carpeta granular de la vía según las recomendaciones de acuerdo a referencias internacionales y experiencia del consultor, los cuales se muestran en detalle en la Tabla 2-15.

Tabla 2-15 Clasificación de la condición de los caminos no pavimentados según el espesor de la capa granular

Adecuación estructural	Espesor Carpeta Granular (mm)				
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Nuevo	80	100	150	200	200
Bueno	80	100	150	200	200
Regular	40	50	100	150	150
Malo	20	25	50	100	100
Muy malo	0	0	25	50	50

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.6 Irregularidad

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI), es un indicador estadístico de la irregularidad superficial, el cual entrega la diferencia entre un perfil longitudinal teórico y el perfil real. Corresponde a la sumatoria de todos los movimientos verticales relativo con respecto a una unidad de longitud.

Debido a que el IRI, es un índice que permite determinar de manera cualitativa la serviciabilidad de la vía, es que existen valores máximos permitidos de acuerdo a la categorización que tenga la vía misma. De allí, que el máximo valor de IRI permitido a una autopista no será el mismo que el que tendrá una vía colectora.

De acuerdo a la Tabla 200-1 del Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras (CEPRENAC, 2010) se seleccionó los valores de IRI, para pavimentos flexibles, rígidos y no pavimentados según el estado del pavimento. De igual forma, se validó con los valores registrados en los talleres de las mesas de trabajo. Los valores para configurar la irregularidad de los pavimentos se muestran en la Tabla 2-16 y Tabla 2-17.

Tabla 2-16 Irregularidad Característica Caminos Pavimentados (m/km)

	Asfáltico/Hormigón			
	Bueno	Regular	Pobre	Muy Malo
Centroamericana	2,0	3,0	4,0	6,0
Nacionales primarias	2,2	3,0	4,0	6,0
Nacionales secundarias	2,5	3,0	5,0	6,5
Departamentales primarias	2,5	3,5	5,0	7,0
Departamentales secundarias	2,7	4,0	6,0	8,0
Departamentales secundarias	3,0	5,0	7,0	8,0
Rurales	3,0	5,0	7,0	8,0

Fuente: Manual Centroamericano de mantenimiento de Carreteras (CEPRENAC, 2010)

Tabla 2-17 Irregularidad Característica Caminos No Pavimentados (m/km)

	No Pavimentado			
	Bueno	Regular	Pobre	Muy Malo
Centroamericana	4,0	5,0	8,0	15,0
Nacionales primarias	4,0	5,0	8,0	15,0
Nacionales secundarias	4,0	5,0	8,0	15,0
Departamentales primarias	5,0	8,0	10,0	18,0
Departamentales secundarias	5,0	8,0	10,0	18,0
Departamentales secundarias	5,0	8,0	10,0	18,0
Rurales	5,0	8,0	10,0	18,0

Fuente: Manual Centroamericano de mantenimiento de Carreteras (CEPRENAC, 2010)

En la Figura 2-9, se presenta de manera gráfica los valores de referencia de irregularidad de los cuales fueron tomados los valores propuestos para los diferentes tipos de pavimentos.

Tabla 200-1
Referencia de Valores de IRI

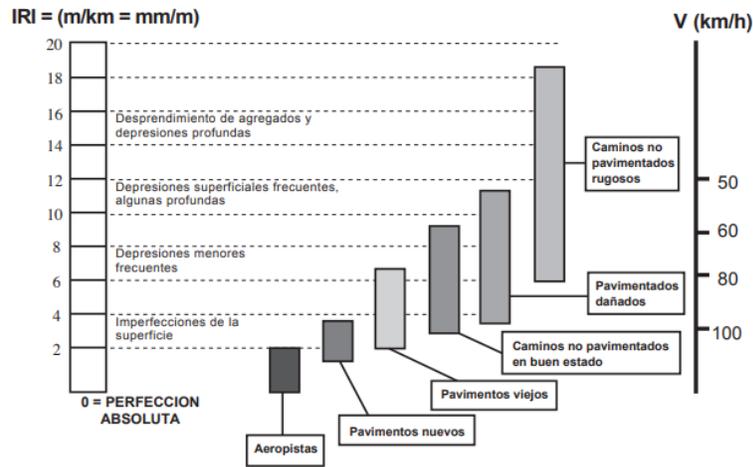


Figura 2-9 Valores referenciales de IRI

Fuente: Manual Centroamericano de mantenimiento de Carreteras (CEPRENAC, 2010)

2.4.1.7 Textura Superficial

La textura de los pavimentos está relacionada a la seguridad de las vías, en lo que refiere a la adherencia y la capacidad de evacuar el agua superficial. La textura es una característica innata de la superficie de la rodadura, la que está en función del tamaño, forma, disposición y distribución del árido y del ligante. Es por eso, que una superficie abierta tendrá una textura, no así es la mezcla densa, que da una superficie suave el cual tendrá una textura fina.

Dentro de la normativa de Guatemala no se encontró ningún valor referencial para el umbral del parámetro de textura, por lo tanto se toma como referencia del Manual de Carreteras de Chile. De acuerdo al numeral 6.203.303, la mediana del umbral de construcción de la resistencia al deslizamiento (SFC), es de 0,65. Mientras que el umbral de alerta se encuentra en torno a 0,45. Particularmente, en la Tabla 6.203.303.C, del Manual de Carreteras de Chile, se obtiene que el umbral de construcción y de alerta de la macrotextura (SMTD), es de 0.6 y 0.4 mm, respectivamente.

En resumen, en la Tabla 2-18, se presentan los datos que se sugiere utilizar para el parámetro **Textura Superficial** de HDM-4.

Tabla 2-18 Categorización de Textura Superficial

	Pavimentos con tratamientos superficiales		Pavimentos con carpetas asfálticas (AM)	
	Profundidad de textura(mm)	Resistencia al Deslizamiento (SCRIM a 50Km/h)	Profundidad de textura(mm)	Resistencia al Deslizamiento (SCRIM a 50Km/h)
Umbral de Construcción (Bueno)	1,50	0,60	0,70	0,50
Regular	0,70	0,45	0,50	0,40
Umbral de Alerta (Antideslizante)	0,30	0,35	0,30	0,35

Fuente: Manual de Carreteras, Vol.6 (MOP, 2016)

2.4.1.8 Tipo de Geometría

La identificación y cuantificación de las características geométricas del camino resultan necesarias al efectuar la tramificación de la red vial existente para efectos de modelación y evaluación. Los parámetros geométricos del camino son requeridos fundamentalmente por el modelo de consumo de recurso y el modelo de deterioro.

Las dos principales características descritas en el **tipo de geometría**, son:

- ✓ Curvatura horizontal
- ✓ Características verticales

a) Curvatura Horizontal:

Corresponde a una medida del grado de curvatura en planta de un camino, el cual permite determinar si el tramo es recto, sinuoso o muy sinuoso. Se expresa en Grados Sexagesimales por Kilómetro (°/Km).

La categorización por curvatura horizontal se puede definir de la siguiente manera:

- Tramo Recto: Sectores en los cuales las curvas son imperceptibles en la circulación vehicular. Se adopta como criterio un valor de curvatura de 20 °/Km.
- Tramo Sinuoso: Curvas horizontales que implican en los conductores disminuciones en la velocidad de circulación. Se adopta como criterio un valor de curvatura de 90 °/Km.
- Tramo Muy Sinuoso: Tramo que presenta curvas y contracurvas, obligando una reducción considerable de la velocidad. Se adopta como criterio un valor de 150°/Km.

b) Características Verticales

Corresponde a las características relacionadas a la variación de altura del tramo en estudio. Se necesita especificar las subidas y bajadas expresadas en metros, la pendiente, el número de ascensos y descensos que presenta el tramo. Con las características especificadas, es posible definir si el terreno es llano, ondulado o montañoso.

De acuerdo al Capítulo 3, del Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (AECID & Ministerio de Asunto Exteriores y de Cooperación, 2011) , las características que definen la categorización vertical de los caminos son:

- Terreno Plano: Es esa condición donde las distancias de visibilidad de diseño vial, en cuanto están gobernadas por las restricciones horizontales y verticales, son generalmente largas o podrían ser así, sin ocasionar mayores dificultades ni grandes gastos de construcción o grandes gastos de construcción. Se puede asumir como valor por defecto de subidas y bajadas de 10 m/Km, mientras que el valor de la pendiente es de +/- 5%.
- Terreno Ondulado: Es la condición donde las pendientes naturales son ascendentes y descendentes y en consecuencia las pendientes de la calle o carretera se elevan y bajan, y donde ocasionalmente las pendientes fuertes provocan algunas restricciones a los alineamientos horizontal y vertical, por lo que las pendientes pueden fluctuar entre 5% a 15%, por lo que se adopta un valor por defecto del 5%. El valor a adoptar de las subidas y bajadas es de 30 m/Km.
- Terreno Montañoso: Es aquel que presenta dificultades y altos costos de construcción por la frecuencia de cortes y rellenos, los cuales se requieren para lograr alineamientos horizontales y verticales aceptables. Las pendientes se encuentran en un rango entre 15% a 30%. Se adopta como valor un 15%. En lo que respecta las subidas y bajas, se adopta un valor por de 50 m/Km.

Entre ambas características geométricas (horizontal y vertical), se realiza un matriz de casos posibles, dando origen a 7 eventos. En lo que respecta a los valores del límite de velocidad de acuerdo con la geometría del tramo según la tabla 9 del Plan de Desarrollo Vial (Mcrit & Disystems, 2018) en el país para zonas rectas y que sean autopistas el límite máximo de velocidad es de 110 km/h. Para vías montañosas y que sean colectoras la velocidad de proyecto es de 40 km/h. Los valores entre ambos extremos fueron prorrateados, observando los valores que trae por defecto, HDM-4. Al igual que los valores del número de ascensos y descensos.

Por lo tanto, los datos que se sugieren utilizar en la descripción geométrica de las vías se visualizan en la Tabla 2-19.

Tabla 2-19 Descripción Geométrica de las vías en Guatemala

	Ascensos y Descensos (m/km)	No. de ascensos y descensos	Curvatura horizontal (grados/km)	Sobreelevación (Peralte) (%)	Límite de Velocidad (km/h)
Recto y plano	1	1	3	2,0	110
Mayormente recto y en pendiente	10	2	15	2,5	100
Con pocas curvas y plano	3	2	50	2,5	100
Con pocas curvas y ondulado	15	2	75	3,0	80
Con pocas curvas y montañoso	25	3	150	5,0	70
Sinuoso y ondulado	20	3	300	5,0	60
Sinuoso y montañoso	40	4	500	7,0	50

Fuente: Elaboración Propia

2.5 Series de Calibración

Los deterioros de los pavimentos es una función que depende del diseño mismo, tipos de materiales, calidad de la construcción, volumen de tránsito, características de los ejes de cargas, geometría del camino, condiciones ambientales, edad del pavimento y de las políticas de mantenimiento.

HDM-4 incluye relaciones para la modelación de los deterioros de pavimentos. Estos son usados con el propósito de predecir anualmente las condiciones de la vía y para la evaluación de estrategias de trabajo.

Para cada modelo de desarrollo y progresión de deterioros, hay diferentes tasas de deterioros en diferentes ambientes, por ello los deterioros podrían siempre ser calibrados a las condiciones del lugar, antes de que sean utilizados en los análisis. Es por esto, que los modelos incluyen un número de factor de calibración denotado por la letra K. Estos factores “K” son multiplicativos y usados para cambiar la escala de un deterioro en particular. El valor por defecto de todos los factores es el valor 1.0.

Por ejemplo, K_{cia} es el factor de calibración de inicio de todas las grietas estructurales en los pavimentos asfálticos. Si el valor de K_{cia} , se incrementa a 2.0 por ejemplo, el tiempo a iniciar todas las grietas estructurales es el doble, implicando que el pavimento demoraría más en que aparezcan grietas predichas por HDM-4. Similarmente incrementar el factor de calibración de progresión de todas las grietas estructurales, K_{opa} a un valor de 2.0, implicará que el pavimento se deteriorará, en términos de tasa de progresión de grietas, dos veces más rápido que lo predicho por el valor por defecto que tiene HDM-4.

De lo anterior, se desprende la importancia de realizar los respectivos estudios para el ajuste de los factores de calibración, para poder adaptar las tasas de deterioros específicas de las carreteras ya sea por su sección transversal, tipo de rodadura y región.

En resumidas cuentas, cuando se habla de un juego de calibración, se entiende como el conjunto de los factores de calibración de los deterioros que adquiere un tipo de pavimento, y en cual también se ingresan otros parámetros que afecten y/o describan el desempeño del pavimento tales como tipo de suelo y caracterización de este, caracterización de los materiales, efectos de la calidad de la construcción y las rehabilitaciones, etc. Los juegos de calibración de los pavimentos son ingresados en el Módulo de Configuración en “***Series de Calibración RD***”.

2.5.1 Series de Calibración en Guatemala

El HDM-4 contiene **modelos de deterioro** para simular el comportamiento de los pavimentos en el tiempo, siendo la idea que estas tendencias representen de la manera más cercana posible la evolución de los daños y deterioros que año a año se presentan en los pavimentos. Sin embargo, existe la posibilidad que para situaciones puntuales y particulares los modelos no representen fielmente lo que ocurre en determinadas circunstancias, razón por la cual se hace necesario el contar con **set de factores de calibración K_{ij}** que permitan ajustar los **modelos de deterioro** y mejorar con ello la simulación y pronóstico de comportamiento futuro de los pavimentos dentro del software.

Por lo tanto, la forma como el HDM-4 colecciona los correspondientes **factores de calibración** K_{ij} para el conjunto de situaciones donde típicamente pudieran diferir las tendencias de comportamiento, consiste en alimentar el módulo “**SERIES DE CALIBRACIÓN**” de la **CONFIGURACIÓN**, el cual está compuesta por conjuntos de factores de ajuste denominados **JUEGOS DE CALIBRACIÓN**.

En esta etapa del proceso de **configuración y parametrización** del software, la idea es identificar solamente los potenciales escenarios que puedan presentarse en Guatemala cuando se requiera diferenciar los casos y situaciones donde la tendencia de comportamiento del pavimento sea diferente a la que entrega el HDM-4 por defecto ($K_{ij}=1$). Por lo tanto, en esta etapa simplemente se definirán mencionados escenarios potenciales, que en adelante conformaran el conjunto de **JUEGOS DE CALIBRACIÓN**, cuyos **factores de calibración** K_{ij} quedaran alimentados con valores ($K_{ij}=1$).

Para la definición de la **SERIE DE CALIBRACIÓN** del **HDM-4** propuesta para Guatemala que se presenta en la Tabla 2-20, se definieron un conjunto de **JUEGOS DE CALIBRACIÓN** determinados por la combinatoria de factores tales como: la localización geográfica (Región) y el tipo de pavimento (estructura y tipo de base) siguiendo la siguiente nomenclatura:



Tabla 2-20 Descripción Geométrica de las vías en Guatemala

Tipo de pavimento	Juego de calibración	Tipo de pavimento
ASFALTO	R1 CentMABG	Mezcla asfáltica sobre base granular
	R1 Cen-MABE	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	R1 Cen-MAAP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
	R2 Ori-MABG	Mezcla asfáltica sobre base granular
	R2 Ori-MABE	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	R2 Ori-MAAP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
	R2 Ori-TSBG	Tratamiento superficial sobre base granular
	R2 Ori-TSBE	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
	R3 Sur-MABG	Mezcla asfáltica sobre base granular
	R3 Sur-MABE	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	R3 Sur-MAAP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico

Tipo de pavimento	Juego de calibración	Tipo de pavimento
	R3 Sur-TSBG	Tratamiento superficial sobre base granular
	R3 Sur-TSBE	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
	R4 Occ-MABG	Mezcla asfáltica sobre base granular
	R4 Occ-MABE	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	R4 Occ-MAAP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
	R4 Occ-TSBG	Tratamiento superficial sobre base granular
	R4 Occ-TSBE	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
	R5 NorB-MABG	Mezcla asfáltica sobre base granular
	R5 NorB-MABE	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	R5 NorB-MAAP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
	R5 NorB-TSBG	Tratamiento superficial sobre base granular
	R5 NorB-TSBE	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
	R6 NorA-MABG	Mezcla asfáltica sobre base granular
	R6 NorA-MABE	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	R6 NorA-MAAP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
	R6 NorA-TSBG	Tratamiento superficial sobre base granular
R6 NorA-TSBE	Tratamiento superficial sobre base estabilizada	
CONCRETO	R1 Cen-JPCPc/b-BG	JPCP Con pasajuntas sobre base granular
	R1 Cen-LC-BG	Losas cortas sobre base granular
	R2 Ori-JPCPc/b-BG	JPCP Con pasajuntas sobre base granular
	R2 Ori-LC-BG	Losas cortas sobre base granular
	R3 Sur-JPCPc/b-BG	JPCP Con pasajuntas sobre base granular
	R3 Sur-LC-BG	Losas cortas sobre base granular
	R4 Occ-JPCPc/b-BG	JPCP Con pasajuntas sobre base granular
	R4 Occ-LC-BG	Losas cortas sobre base granular
	R5 NorB-JPCPc/b-BG	JPCP Con pasajuntas sobre base granular
	R5 NorB-LC-BG	Losas cortas sobre base granular
	R6 NorA-JPCPc/b-BG	JPCP Con pasajuntas sobre base granular
	JPCPs/b-BG	JPCP sin pasajuntas sobre base granular
	JPCPc/b-BE	JPCP con pasajuntas sobre base granular estabilizada
NO PAVIMENTADO	R1 Cen-Balastada	Material natural
	R1 Cen-Terracería	Terracería
	R2 Ori-Balastada	Material natural
	R2 Ori-Terracería	Terracería
	R3 Sur-Balastada	Material natural
	R3 Sur-Terracería	Terracería
	R4 Occ-Balastada	Material natural

Tipo de pavimento	Juego de calibración	Tipo de pavimento
	R4 Occ-Terracería	Terracería
	R5 NorB-Balastada	Material natural
	R5 NorB-Terracería	Terracería
	R6 NorA-Balastada	Material natural
	R6 Nor A-Terracería	Terracería

Los **factores de calibración** que en esta versión preliminar presentan valores de 1, se definen según los tipos de deterioros de los pavimentos. A continuación, se relaciona los factores y su respectiva descripción.

Para la calibración de los pavimentos de asfalto, los factores de calibración son los nombrados a continuación:

- Kcia: Factor de Calibración para el Inicio de Grietas Totales
- Kcpa: Factor de Calibración para la Progresión de Grietas Totales
- Kciw: Factor de Calibración para el Inicio de Grietas Anchas
- Kcpw: Factor de Calibración para la Progresión de Grietas Anchas
- Kvi: Factor de Calibración para el Inicio de Desprendimiento de Áridos
- Kvp: Factor de Calibración para la Progresión de Desprendimiento de Áridos
- Krid: Factor de Calibración para la Densificación Inicial
- Krst: Factor de Calibración para el Ahuellamiento Estructural
- Krpd: Factor de Calibración para la Deformación Plástica
- Krds: Factor de Calibración para la Desviación del Ahuellamiento
- Kgm: Factor de Calibración de la Componente Ambiental del IRI
- Kgp: Factor de Calibración de la Componente de Baches del IRI
- Kgs: Factor de Calibración de la Componente Estructural del IRI
- Kgc: Factor de Calibración de la Componente de Grietas del IRI
- Kgr: Factor de Calibración de la Componente del Ahuellamiento del IRI

En lo que respecta a la calibración de los pavimentos de hormigón tradicional y losas cortas, los factores de calibración son:

- Kjpn: Factor de Calibración del Escalonamiento
- Kjpc: Factor de Calibración del Agrietamiento
- Kjpr: Factor de Calibración del IRI
- Kjps: Factor de Calibración del Despostillamiento

Particularmente, independiente de que no se haya realizado un estudio de calibración formal se sugiere utilizar para el caso de los pavimentos de concreto para el Factor K_{jpc} un valor de 0.2 para pavimentos del tipo JPCP. De otro lado, es importante mencionar que dado que el programa HDM-4 tiene la restricción de una longitud mínima de losa de 3 metros, en teoría no se podrían modelar losas de menor tamaño, sin embargo para el caso de las losas cortas se puede encontrar un factor de calibración K_{jpc} apoyándose en modelación con la herramienta OPTIPAVE (programa para el diseño de losas cortas), mientras se desarrolla tal análisis se definió un juego de calibración para las losas cortas en donde se asignó al factor de calibración K_{jpc} un valor de 0.15 preliminarmente.

2.6 Tipos de Accidentes

Un accidente es un evento en la ruta que involucra a uno o más vehículos, con resultados de muerte, daños a las personas y/o daños a la propiedad. En HDM-4, los efectos de seguridad en las carreteras son analizados de acuerdo a un seguimiento a la severidad de los accidentes:

- ✓ Fatal: Un accidente es considerado como fatal, si ocurre un deceso dentro de un período de tiempo posterior al accidente. Este período de tiempo varía de acuerdo al criterio de cada país. Cabe señalar que hasta el año 2014, este período de tiempo correspondía a 24 horas, sin embargo las adecuaciones a los estándares OCDE, hicieron aumentar el período para considerar un accidente hasta los 30 días de ocurrido el accidente (OECD & IRTAD, 2016).
- ✓ Heridos: Son los accidentes que causan heridos, pero sin resultado de muerte.
- ✓ Solo daños: Cuando un accidente ocurre sin personas lesionadas es considerado como un accidente con solo daños a la propiedad.

Para HDM-4, el término tasa de accidente (ya sea fatal, heridos y solo daños), es definido como el promedio del tipo de accidente reportado por año, previa evaluación estadística, dividido por la exposición a accidentes. En las Ecuaciones 2-1 y 2-2, se expresan ambos conceptos señalados. Las respectivas tasas de accidentes, en HDM-4, son expresadas en términos de número de accidentes por año, por cada 100 millones de vehículos-kilómetro.

$$ACCRATE = \frac{ACCYR}{EXPOSURE} \quad \text{(Ecuación 2-2)}$$

Donde:

ACCRATE: Tasa de Accidentes.

ACCYR: Número de Accidentes por año.

EXPOSURE: Exposición anual a accidentes en una sección del camino (100 millones de veh-km).

La exposición anual a los accidentes es calculado de la siguiente manera:

$$EXPOSURE = \frac{365 * TMDA * L}{10^8} \quad \text{(Ecuación 2-3)}$$

Donde:

TMDA: Tráfico medio anual diario de una sección (veh/día).

L: Largo de la sección del camino (Km).

2.6.1 Tipos de Accidentes en Guatemala

El software HDM-4 para ingresar la tasa de accidentalidad solicita la exposición anual a accidentes en una sección del camino, que está dada por unidades de 100 millones de veh-km. Debido a la falta de información respecto a este factor que requiere ingresarse, se crearon los escenarios que podrían presentarse en las diferentes tipologías de carreteras existentes en Guatemala. Cabe resaltar que todos sus parámetros están cargados con valor igual a cero, pero que deben ajustarse a las condiciones reales del proyecto a evaluar.

A continuación, se presenta la lista de escenarios que fueron ingresados en la configuración del HDM-4:

1. Sin accidentes
2. Tasa Acc. Global Guatemala
3. Tasa Acc. Media Carreteras Centroamericanas
4. Tasa Acc. Media Carreteras Departamentales
5. Tasa Acc. Media Carreteras Nacionales
6. Tasa Acc. Media Rurales
7. Tasa Acc. Típica Carretera 2 carriles
8. Tasa Acc. Típica Carretera 2 carriles -Trazado Alta Montaña
9. Tasa Acc. Típica Carretera 2 carriles – Trazado Ondulado
10. Tasa Acc. Típica Carretera 4 carriles (2 carriles por sentido)
11. Tasa Acc. Típica Carretera 6 o más carriles (3 carriles por sentido)
12. Tasa Acc. Típica Carretera un carril

3 FLOTA VEHICULAR Y ESTÁNDARES DE TRABAJO

3.1 Flota Vehicular

En el HDM-4 uno de los módulos principales de captura de datos es el denominado FLOTA VEHICULAR, el cual le permite al usuario alimentar el software con los datos e información que caracteriza a cada uno de los vehículos que en conjunto conforman el parque de vehículos en que se supone se encuentra clasificada y subdividida la flota de vehículos que típicamente circulara por el camino o red de caminos que se pretende modelar.

Por lo tanto, la definición de una flota vehicular dentro del HDM-4 supone primero la identificación de los distintos tipos de vehículos que representaran cada categoría (clasificación) de vehículo que componen este conjunto, para posteriormente asignar los valores que le correspondan a cada uno de los parámetros con que se caracterizan los vehículos en HDM-4. Dicho de otra forma, se identifican y caracterizan los vehículos tipo que representaran la flota vehicular con la que se representara la masa vehicular que circulara por los caminos o secciones de camino que sean objeto de estudio en el HDM-4.

En el presente capítulo se explica para el caso específico de Guatemala como está conformado el parque vehicular existente en el país y cuáles son los valores que se adoptaron para los diferentes parámetros que caracterizan un vehículo en el software con la intención de definir el vehículo tipo que representa una clasificación o categoría existente en el país y que debería contemplarse para la modelación con HDM-4. La mencionada definición de la Flota vehicular y los vehículos típicamente representativos para el caso particular de Guatemala.

3.1.1 Resultados de la Definición de Flota Vehicular de HDM-4 aplicable a Guatemala

Es importante mencionar que para el proceso de definición de la composición del parque vehicular a considerar, se procuró encontrar el conjunto de vehículos tipo más representativo en la actualidad para Guatemala. Dentro de las principales fuentes consultadas para cumplir con el propósito se encuentran las siguientes:

- Estadística Vehicular manual DGC caminos (Caminos, 2022)
- Reglamento Control Pesos y Dimensiones (Caminos, 1992)

La flota vehicular a considerar en este estudio considera la distribución del parque automotor sobre la base de 10 categorías de vehículos, que se dividen en 2 categorías con diferencias entre su comportamiento y mercado, los vehículos livianos y los vehículos pesados. De igual forma dicha composición fue validada en los talleres realizados en las mesas de trabajo. En la Tabla 3-1 se presentan los tipos de vehículos cargados en la configuración del HDM-4.

Tabla 3-1 Flota vehicular representativa para Guatemala

Tipo de vehículo	
Automóviles	
Pick up	
Microbús	
Buses	
C2	
C3	
C4	
T3-S2	
T3-S3	
T3-S2-R4	

Dentro del software HDM-4 se definieron tres flotas vehiculares que se nombran a continuación:

- Flota vehicular estándar de Guatemala
- Flota vehicular precios máximos de Guatemala
- Flota vehicular precios mínimos de Guatemala

Las flotas definidas se diferencian por los precios que varían según la zona de influencia del proyecto. La flota vehicular estándar se modeló con valores promedios en los costos de litro de lubricante, litro de gasolina y neumático nuevo; y las dos flotas siguientes con los máximos y mínimos que fueron extraídos de los talleres realizados en las mesas de trabajo. En la Figura 3-1 se presentan los costos unitarios económicos que fueron cargados en la configuración de la flota vehicular.

HDM - 4		Vehicle Fleet - Economic											
HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT		Study Name: red ejemplo											
		Run Date: 26-09-2022											
		Currency: Quetzal											
Motorised Vehicle Types:													
Name	Base Type	New Vehicle	Replac Tyrs	Fuel (per litre)	Lubr. Oi (per litre)	Main Labour (per hr)	Crew Wage (per hr)	Annua Overheat	Annua Interes (%)	Passenge Work Tim (per hr)	Passenge Non-Work (per hr)	Cargc Holding (per hr)	
04 Bus	Heavy Bus	500,000	1,400	10,80	65,00	25,00	31,00	25,000	10,00	12,50	9,38	0,00	
06 C3	Heavy Truck	325,000	1,400	10,80	65,00	40,00	50,00	26,000	10,00	0,00	0,00	0,00	
10 T3-S2-R4	Articulated Truck	725,000	1,400	10,80	65,00	40,00	50,00	58,000	10,00	0,00	0,00	0,00	
09 T3-S3	Articulated Truck	725,000	1,400	10,80	65,00	40,00	50,00	58,000	10,00	0,00	0,00	0,00	
08 T3-S2	Articulated Truck	725,000	1,400	10,80	65,00	40,00	50,00	58,000	10,00	0,00	0,00	0,00	
07 C4	Heavy Truck	325,000	1,400	10,80	65,00	40,00	50,00	26,000	10,00	0,00	0,00	0,00	
05 C2	Light Truck	280,000	1,400	10,80	75,00	40,00	50,00	1,400	10,00	0,00	0,00	0,00	
03 Microbus	Medium Bus	250,000	1,400	10,80	65,00	25,00	31,00	12,500	10,00	12,50	9,38	0,00	
02 Pick Up	Light Goods	120,000	480	9,42	70,00	25,00	0,00	6,000	10,00	12,50	9,38	0,00	
01 Automóvil	Medium Car	100,000	450	9,43	60,00	25,00	0,00	5,000	10,00	12,50	9,37	0,00	

Figura 3-1 Costos económicos unitarios de flota vehicular

Las características básicas de los tipos de vehículos para la definición de la flota vehicular fueron establecidas a partir de valores sugeridos, basados en distintos parámetros obtenidos de referencias internacionales, valores predeterminados por el HDM-4, información recolectada de las mesas de trabajo y la experiencia del consultor. En la Figura 3-2 se muestra el consolidado de las características básicas de los tipos de vehículos motorizados.

HDM - 4		Vehicle Fleet - Basic													
HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT		Study Name: red ejemplo													
		Run Date: 26-09-2022													
Motorised Vehicle Types:															
Name	Base Type	PCSE	No. o Wheel:	No. o Axles	Tyre Type	Tyrs Base Recap:	Tyrs Retrear Cost (%)	Annua Km	Annua Work Hours	Avg Life	Privat Use (%)	Passenger: (%)	Work Relater Trips (%)	ESALF	Oper Life Weigh Model (t)
04 Bus	Heavy Bus	1,60	10	3	Bias ply	2,00	15,00	80,000	2,000	10	0	45,00	75,00	0,80	10,00 Optima
06 C3	Heavy Truck	1,60	10	3	Bias ply	2,00	15,00	120,000	2,100	10	0	0,00	0,00	1,60	22,00 Optima
10 T3-S2-R4	Articulated Truck	1,80	34	9	Bias ply	2,00	15,00	80,000	2,100	2	0	0,00	0,00	3,00	57,00 Optima
09 T3-S3	Articulated Truck	1,80	22	6	Bias ply	2,00	15,00	80,000	2,100	12	0	0,00	0,00	2,27	41,00 Optima
08 T3-S2	Articulated Truck	1,80	18	5	Bias ply	2,00	15,00	80,000	2,100	12	0	0,00	0,00	2,59	37,00 Optima
07 C4	Heavy Truck	1,60	12	4	Bias ply	2,00	15,00	120,000	2,100	10	0	0,00	0,00	1,03	25,00 Optima
05 C2	Light Truck	1,30	6	2	Bias ply	2,00	15,00	50,000	2,100	10	0	0,00	0,00	2,46	15,50 Optima
03 Microbus	Medium Bus	1,50	6	2	Bias ply	1,50	15,00	6,000	2,000	10	0	32,00	75,00	0,70	6,00 Optima
02 Pick Up	Light Goods	1,00	4	2	Bias ply	0,00	15,00	50,000	1,300	12	0	1,20	100,00	0,01	2,00 Optima
01 Automóvil	Medium Car	1,00	4	2	Radial ply	0,00	15,00	20,000	550	20	100	1,50	75,00	0,00	1,20 Consta

Figura 3-2 Características básicas de los tipos de vehículos motorizados definidos para la flota vehicular de Guatemala

Para las tasas de crecimiento fueron creadas un conjunto de series basados en un análisis regional y por tipo de caminos según la clasificación vial representativa de Guatemala. Se crearon 20 casos los cuales fueron definidos con tasa de crecimiento recolectadas de las mesas de trabajo y las establecidas en el documento de estadística vehicular de Guatemala (Caminos, 2022). En la Tabla 3-2 se muestran las series que fueron creadas con su respectiva nomenclatura y descripción.

Tabla 3-2 Series de crecimiento de tránsito para la flota vehicular

Nombre	Descripción
01 CA Máx.	Tasa de crecimiento Centroamericana Máxima
01 CA Mín.	Tasa de crecimiento Centroamericana Mínima
02 Nac. Máx.	Tasa de crecimiento Nacionales Máxima
02 Nac. Mín.	Tasa de crecimiento Nacionales Mínima
03 Dep. Máx.	Tasa de crecimiento Departamental Máxima
03 Dep. Mín.	Tasa de crecimiento Departamental Mínima
04 Rural Máx.	Tasa de crecimiento Rurales Máxima
04 Rural Mín.	Tasa de crecimiento Rurales Mínima
R1-Cen. Máx.	Región 1-Centro Tasa Máxima
R1-Cen. Mín.	Región 1-Centro Tasa Mínima
R2-Or. Máx.	Región 2-Oriente Tasa Máxima
R2-Or. Mín.	Región 2-Oriente Tasa Mínima
R3-Sur Máx.	Región 3-Sur Tasa Máxima
R3-Sur Mín.	Región 3-Sur Tasa Mínima
R4-Occ. Máx.	Región 4-Occidente Tasa Máxima
R4-Occ. Mín.	Región 4-Occidente Tasa Mínima
R5-Nor.Bajo Máx.	Región 5-Norte Bajo Tasa Máxima
R5-Nor.Bajo Mín.	Región 5-Norte Bajo Tasa Mínima
R6-Nor.Alto Máx.	Región 6-Norte Alto Máxima
R5-Nor.Alto Mín.	Región 6-Norte Alto Tasa Mínima

Según el documento de estadística vehicular de Guatemala (Caminos, 2022), se generan porcentajes de crecimiento anual basado en los datos recopilados en estudios de tránsito de años anteriores y estos han mostrado rangos que se mantienen según la clasificación de las rutas, por lo que los factores generados han dado como resultado los porcentajes aplicados a continuación detallados y que fueron la base para establecer las series de tasa de crecimiento cargadas en el HDM-4:

RUTAS DE PRIMER ORDEN

Rutas centro americanas De 0.1% hasta 5%
Rutas nacionales De 0.1% hasta 4.5%

RUTAS DE SEGUNDO ORDEN

Rutas departamentales De 0.1% hasta 3.5%
Caminos rurales De 0.1% hasta 3%

En la siguiente tabla se presentan los valores definidos en el software para las tasas de crecimiento según los valores obtenidos de las mesas de trabajo.

Tabla 3-3. Tasa de crecimiento para el tipo de vehículo según la flota vehicular definida

Regiones	Automóviles	Buses		Camiones		
						
Tasas de crecimiento (%)						
Región 1 Centro	2.0 a 3.5	1.8 a 2.0	1.8 a 2.0	2.0	1.0	2.0
Región 2 Oriente	1.8 a 2.5	1.5 a 2.0	1.5 a 1.8	1.5 a 2.0	1.0	2.0
Región 3 Sur	2.5 a 3.0	1.8 a 2.0	1.8 a 2.0	2.0	1.0	2.5 a 3.0
Región 4 Occidente	2.5 a 3.0	1.8 a 2.0	1.0 a 2.0	2 a 2.5	2.0	1.0
Región 5 Norte Abajo	2.0 a 3.0	1.5 a 2.0	1.0	2 a 2.5	2.0	0.5
Región 6 Norte Alto	1.0 a 2.0	1.5 a 2.0	1.0	1.5 a 2	1.0	0.5

4 ESTÁNDARES DE TRABAJO

Al diseñar y construir un camino, idealmente se esperaría que durante toda su “vida útil” este se desempeñaría de manera óptima. Sin embargo, la “vida útil” del pavimento, es sencillamente un valor teórico que no coincide necesariamente con el desempeño que experimenta el pavimento cuando se encuentra en función. Por ello, comúnmente es posible encontrar que antes del fin del período de diseño del pavimento, este se encuentra deteriorado.

Los deterioros se pueden clasificar en funcionales y estructurales. Los deterioros funcionales, comprenden a los relacionados a la serviciabilidad y seguridad de la vía, como los son el escalonamiento e IRI. Por otra parte, el deterioro estructural se encuentra relacionado a la pérdida de capacidad portante del suelo o de alguna capa que componga el pavimento, tal es el caso del ahuellamiento, grietas, baches, etc.

Que el pavimento se encuentre deteriorado antes de lo predicho puede deberse a diversos factores, tales como: comportamiento del tránsito (mayor crecimiento vehicular de lo pronosticado, mala estimación del TMDA, mal cálculo de los FEC, etc), factores ambientales (temperatura, radiación, precipitaciones, etc) y calidad de la construcción (expresados en HDM-4 en los factores CDS y CDB). Dado que estos factores no son controlados por el diseñador, se hace necesario aplicar medidas de conservación sobre los pavimentos.

La necesidad de realizar medidas de conservación en el momento propicio afecta positivamente en tres situaciones:

- Aumenta la seguridad de conducción y su comodidad.
- El tiempo de viaje disminuye junto con los costos de operación vehicular.

- El costo de inversión en la vía será menor que si espera un mayor nivel de deterioro del pavimento.

En base a lo anterior, es que se hace necesario establecer límites máximos de deterioros permitidos en los pavimentos. De acuerdo a la importancia de la vía, seguridad y gestión eficaz de los recursos.

4.1.1 Tipos de Estándares Según la Superficie de Rodadura

Los estándares de conservación se pueden categorizar en tres tipos según el manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras (CEPRENAC, 2010) :

- Mantenimiento rutinario: Es el conjunto de actividades necesarias para que la carretera conserve un nivel de servicio entre regular y bueno.
- Mantenimiento periódico: Se refiere a las obras de mantenimiento programadas con una frecuencia mayor a un año. Su fin es brindar un cierto estándar de servicio del pavimento.
- Trabajos de emergencia: Se considera “emergencia” toda acción no prevista ni ponderable, debida a las fuerzas de la naturaleza o acciones humanas impredecibles que obstaculicen la vía impidiendo el libre tránsito.

Cada estándar de conservación nombrado anteriormente presenta unas acciones de mantenimiento específicas que se describen en el Manual, en la Tabla 4-1 se presenta el listado de cada una de las acciones relacionadas las cuales fueron el punto de partida para definir los estándares de mejoramiento cargados en el HDM-4.

Tabla 4-1. Acciones de mantenimiento para los estándares de conservación

Tipo de mantenimiento	Acciones de mantenimiento
Rutinario	Desmonte del derecho de vía
	Limpieza de cunetas revestidas
	Limpieza de cunetas de tierra
	Limpieza de alcantarillas
	Reperfilado en carreteras de tierra
	Reperfilado con compactación de carreteras
	Reperfilado con compactación de hombros
	Sello de juntas y grietas en pavimentos y hombros de concreto hidráulico
	Sello de fisuras y grietas en pavimentos y hombros asfálticos
	Bacheo en carreteras y hombros de mezclas asfálticas
	Bacheo de tratamientos superficiales y hombros tratados
	Limpieza, reacondicionamiento y reposición de señales verticales

Tipo de mantenimiento	Acciones de mantenimiento
	Limpieza y restitución de defensas metálicas
	Mantenimiento de señalización horizontal
	Conservación de puentes
	Limpieza de la superficie de rodadura
	Reposición de vialetas u ojos de gato.
	Conservación de alcantarillas
	Reemplazo de losas de hormigón
Periódico	Reposición de balasto en carreteras no pavimentadas.
	Aplicación de sellos sobre pavimentos asfálticos.
	Aplicación de tratamientos especiales como lechada asfáltica y otros
	Colocación de sobrecapas de asfalto (recapeo)
	Aplicación de tratamientos especiales como reciclaje de pavimentos existentes y otros
	Aplicación de capas de concreto hidráulico, tipo "white topping" u otros.
Emergencia	Remoción de derrumbes
	Construcción de desviaciones e instalación de puentes provisionales.

Fuente: Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras (CEPREDENAC, 2010)

4.1.2 Estándares de conservación Sugeridos

Los umbrales de intervención son los valores límites (máximos o mínimos) de los parámetros de deterioro (funcional o estructural), por sobre o bajo los cuales se entenderá necesario realizar una acción de conservación sobre la calzada para restablecer el estado de cumplimiento del respectivo parámetro o indicador. Estas acciones corresponden a acciones rutinarias y periódicas.

Dicho lo anterior, los umbrales de intervención constituyen una suerte de "válvula de regulación" de los estándares de conservación, cuando estos contienen acciones de conservación activadas por una condición de respuesta, dado que a través del manejo de dichos valores límites es posible "controlar" el nivel de servicio que se desea reestablecer a la calzada.

En base a las actividades recolectadas según las mesas de trabajo y los manuales de mantenimiento utilizados en Guatemala, la consultora sugiera utilizar las siguientes medidas de

conservación en los diferentes tipos de pavimentos. En la Figura 4-1 se presenta los diferentes estándares de conservación creados en el software HDM-4 los cuales fueron considerados teniendo en cuenta los posibles escenarios que puedan presentarse según la clasificación vial y tipo de pavimento de Guatemala.

Estándares de conservación [27]	
M	01_A-MA-P-RUT - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Primaria - Mantenimiento Rutinario
M	02_A-MA-P-PP - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Primaria - Periódica Programada
M	03_A-MA-P-PR - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Primaria - Periódica con Respuesta
M	04_A-MA-P-REH - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Primaria - Rehabilitación
M	05_A-MA-ST-RUT - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Sec & Ter - Mantenimiento Rutinario
M	06_A-MA-ST-PP - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Sec & Ter - Periódica Programada
M	07_A-MA-ST-PR - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Sec & Ter - Periódica con Respuesta
M	08_A-MA-ST-REH - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Sec & Ter - Rehabilitación
M	09_A-TS-RUT - Asfalto - Tratamiento superficial - Mantenimiento Rutinario
M	10_A-TS-PP - Asfalto - Tratamiento superficial - Periódica Programada
M	11_A-TS-PR - Asfalto - Tratamiento superficial - Periódica con Respuesta
M	12_A-TS-REH - Asfalto - Tratamiento superficial - Rehabilitación
M	13_C-JPCP-RUT - Concreto - JPCP - Mantenimiento Rutinario
M	14_C-JPCP-PP - Concreto - JPCP - Periódica Programada
M	15_C-JPCP-PR - Concreto - JPCP - Periódica con Respuesta
M	16_C-JPCP-REH - Concreto - JPCP - Rehabilitación
M	17_C-LC-RUT - Concreto - Losas cortas - Mantenimiento Rutinario
M	18_C-LC-PP - Concreto - Losas cortas - Periódica Programada
M	19_C-LC-PR - Concreto - Losas cortas - Periódica con Respuesta
M	20_C-LC-REH - Concreto - Losas cortas - Rehabilitación
M	21_NP-TER.-RUT - No Pavimentado - Terraceria - Mantenimiento Rutinario
M	22_NP-TER.-PP - No Pavimentado - Terraceria - Periódica Programada
M	23_NP-BAL.-RUT - No Pavimentado - Balastada - Mantenimiento Rutinario
M	24_NP-BAL-PP - No Pavimentado - Balastada - Periódica Programada
M	25_A-MA-EME - Asfalto - Mezcla Asfáltica - Emergencia
M	26_C-JPCP-EME - Concreto - JPCP - Emergencia
M	27_NP-TER.-EME - No Pavimentado - Emergencia

Figura 4-1 Estándares de conservación definidos para Guatemala

En la Tabla 4-2 se muestran los estándares de conservación relacionados en el “object” de Guatemala, indicando los tipos de trabajo, diseño, criterio, efecto, costos económicos y costos financieros; los cuales fueron definidos según los datos recolectados de las mesas de trabajo y la experiencia del consultor.

Tabla 4-2. Estándares de conservación sugeridos para los diferentes tipos de pavimentos

No.	Código	Descripción	Tipos de trabajo	Diseño	Criterio	Efecto	Costos (Q) Ec.	Costos (Q) Fin.	Unidad
1	A-MA-P-RUT	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Primaria-Mantenimiento Rutinario	Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	44000	55000	km/año
			Sello de grietas	NA	C/año	Sellar 100% de grietas anchas	15	18.5	m2
			Bacheo	NA	C/año	Reparar 100% de baches	130	163	m2
2	A-MA-P-PP	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Primaria-Periódica Programada	Sellos sobre pavimentos asfálticos	-	C/6años	-	22.5	28.1	m2
			Sobrecapa de asfalto	Espesor 40mm	C/8años	IRI de 2.5 m/km después de los trabajos	87	109	m2
3	A-MA-P-PR	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Primaria-Periódica con Respuesta	Lechada asfáltica	Espesor 10mm	10% de grietas totales		22.5	28.1	m2
			Reciclados	Fresar 50mm y Rep. 50mm - ai=0.35	10% de grietas anchas o 10 mm de ahuellamiento	IRI de 2.5 m/km después de los trabajos	109.8	137	m2
4	A-MA-P-REH	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Primaria-Rehabilitación	Rehabilitación	Fresar 50mm y Rep. 100mm - ai=0.43	IRI =3.5 m/km	IRI de 2.2 m/km después de los trabajos	197	246.2	m2
5	A-MA-ST-RUT	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Sec & Ter -Mantenimiento Rutinario	Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	44000	55000	km/año
			Sello de grietas	NA	C/año	Sellar 100% de grietas anchas	15	18.5	m2
			Bacheo	NA	C/año	Reparar 100% de baches	130	163	m2
6	A-MA-ST-PP	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Sec & Ter-Periódica Programada	Sellos sobre pavimentos asfálticos		C/7años	-	22.5	28.1	m2

No.	Código	Descripción	Tipos de trabajo	Diseño	Criterio	Efecto	Costos (Q) Ec.	Costos (Q) Fin.	Unidad
			Sobrecapa de asfalto	Espesor 40mm	C/10 años	IRI de 2.5 m/km después de los trabajos	87	109	m2
7	A-MA-ST-PR	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Sec & Ter-Periódica con Respuesta	Lechada asfáltica	Espesor 10mm	15% de grietas totales		22.5	28.1	m2
			Reciclados	Fresar 50mm y Rep. 50mm - ai=0.35	15% de grietas anchas o 15 mm de ahuellamiento	IRI de 2.8 m/km después de los trabajos	109.8	137	m2
8	A-MA-P-REH	Asfalto -Mezcla Asfáltica-Primaria-Rehabilitación	Rehabilitación	Fresar 50mm y Rep. 100mm - ai=0.43	IRI =3.8 m/km	IRI de 2.2 m/km después de los trabajos	197	246.2	m2
9	A-TS-RUT	Asfalto -Tratamiento superficial -Mantenimiento Rutinario	Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	44000	55000	km/año
			Bacheo	NA	C/año	Reparar 100% de baches	130	163	m2
10	A-TS-PP	Asfalto -Tratamiento superficial -Periódica Programada	Sellos sobre pavimentos asfálticos	NA	C/3años	-	18.9	23.7	m2
11	A-TS-PR	Asfalto -Tratamiento superficial -Periódica con Respuesta	Sellos sobre pavimentos asfálticos	NA	15% de grietas totales	-	18.9	23.7	m2
12	A-TS-REH	Asfalto -Tratamiento superficial -Rehabilitación	Doble Tratamiento Superficial	Espesor 25 mm	20% de grietas totales O IRI 4 m/km	IRI de 2.5 m/km después de los trabajos	44.3	55.3	m2
13	C-JPCP-RUT	Concreto -JPCP- Mantenimiento Rutinario	Sello de juntas	NA	C/3años	Colocar sello preformado	26.4	34	m
			Reparación de juntas	NA	C/2años	Reparar el 20% de las juntas afectadas	37.6	47	m
			Remplazo de losas	NA	C/3años	Reparar el 20% de las losas con grietas	344.7	430.9	m2

No.	Código	Descripción	Tipos de trabajo	Diseño	Criterio	Efecto	Costos (Q) Ec.	Costos (Q) Fin.	Unidad
			Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	44000	55000	km/año
14	C-JPCP-PP	Concreto -JPCP-Periódica Programada	Reemplazo de losas	NA	C/5años	Reparar el 30% de las losas con grietas	344.7	430.9	m2
			Cepillado	NA	C/10años	Cepillar 3 mm - IRI despues del cepillado 2m/km después de los trabajos	27.4	34	m2
15	C-JPCP-PR	Concreto -JPCP-Periódica con Respuesta	Reemplazo de losas	NA	% losas agrietadas mayor 30%	Reparar el 30% de las losas con grietas	344.7	430.9	m2
			Cepillado	NA	IRI>3.5 m/km	Cepillar 2 mm - IRI despues del cepillado 2.5 m/km después de los trabajos	27.4	34	m2
16	C-JPCP-REH	Concreto -JPCP-Rehabilitación	Reemplazo 100% de losas	NA	% losas agrietadas mayor 50%	Reparar el 100% de las losas con grietas	344.7	430.9	m2
			Cepillado	NA	% losas agrietadas mayor 50%	Cepillar 2 mm - IRI despues del cepillado 2.5 m/km después de los trabajos	27.4	34	m2
17	C-LC-RUT	Concreto - Losas Cortas - Mantenimiento Rutinario	Reparación de juntas	NA	C/2años	Reparar el 10% de las juntas afectadas	37.6	47	m
			Reemplazo de losas	NA	C/3años	Reparar el 10% de las losas con grietas	206.8	258.5	m2

No.	Código	Descripción	Tipos de trabajo	Diseño	Criterio	Efecto	Costos (Q) Ec.	Costos (Q) Fin.	Unidad
			Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	44000	55000	km/año
18	C-LC-PP	Concreto -Losas cortas-Periódica Programada	Reemplazo de losas	NA	C/5años	Reparar el 25% de las losas con grietas	206.8	258.5	m2
			Cepillado	NA	C/12años	Cepillar 3 mm - IRI despues del cepillado 2m/km después de los trabajos	27.4	34	m2
19	C-LC-PR	Concreto -Losas cortas-Periódica con Respuesta	Reemplazo de losas	NA	% losas agrietadas mayor 30%	Reparar el 30% de las losas con grietas	206.8	258.5	m2
			Cepillado	NA	IRI>3.5 m/km	Cepillar 2 mm - IRI despues del cepillado 2.5 m/km después de los trabajos	27.4	34	m2
20	C-LC-REH	Concreto -Losas cortas-Rehabilitación	Reemplazo 100% de losas	NA	% losas agrietadas mayor 50%	Reparar el 100% de las losas con grietas	206.8	258.5	m2
			Cepillado	NA	% losas agrietadas mayor 50%	Cepillar 2 mm - IRI despues del cepillado 2.5 m/km después de los trabajos	27.4	34	m2
21	NP-TER.-RUT	No Pavimentado-Terraceria-Rutinario	Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	8800	11000	km/año
			Reperfilado		C/90días	NA	2.3	2.9	m2
22	NP-TER.-PP	No Pavimentado-Terraceria-Periódica Programada	Reposición de balasto	50mm de balasto	C/año	NA	156	195	m3
23	NP-BAL.-RUT	No Pavimentado-Balastada-Rutinario	Mantenimiento rutinario	NA	C/año	NA	8800	11000	km/año

No.	Código	Descripción	Tipos de trabajo	Diseño	Criterio	Efecto	Costos (Q) Ec.	Costos (Q) Fin.	Unidad
			Reperfilado		C/180días	NA	2.3	2.9	m2
24	NP-BAL.-PP	No Pavimentado-Balastada-Periódica Programada	Reposición Puntual	Reposición 100% material perdido	C/año	NA	148.3	185.4	m3
25	A-MA-EME	Asfalto - Mezcla Asfáltica - Emergencia	Emergencia	NA		NA			km/año
26	C-JPCP-EME	Concreto-JPCP-Emergencia	Emergencia	NA		NA			km/año
27	NP-TER-EME	No Pavimentado - Emergencia	Emergencia	NA		NA			km/año

4.1.3 Estándares de Mejora

Los estándares de mejoras se encuentran principalmente asociados los niveles de servicio y capacidad de la vía, a diferencia de los estándares de conservación, los cuales se relacionan a la serviciabilidad del camino. En la Figura 4-2 se presentan los estándares de mejoras para los diferentes tipos de vías que se consideran representativas para Guatemala. Estas obras, están asociadas a los volúmenes de tránsito y grados de saturación.

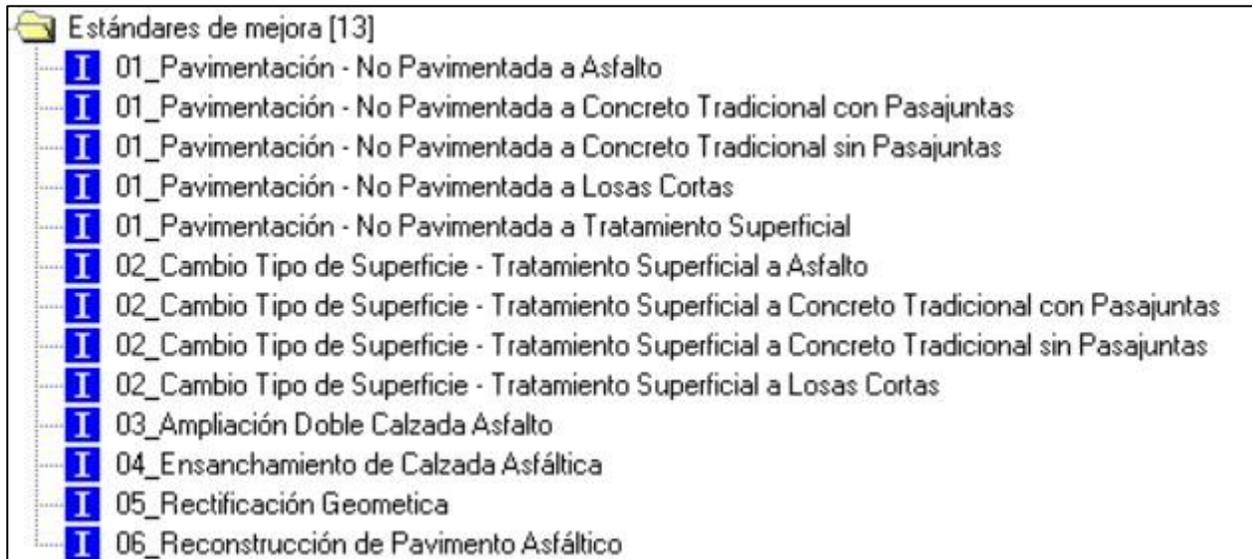


Figura 4-2 Estándares de mejora definidos para Guatemala

En la Tabla 4-3 se muestran los estándares de mejora relacionados en el “object” de Guatemala, indicando los tipos de trabajo, diseño, criterio, efecto, costos económicos y costos financieros; los cuales fueron definidos según los datos recolectados de las mesas de trabajo y la experiencia del consultor.

Tabla 4-3. Estándares de mejora sugeridos para los diferentes tipos de pavimentos

Descripción	Tipo de Mejora	Diseño
Pavimentación - No Pavimentada a Asfalto	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: Mezcla Asfáltica sobre base granular
Pavimentación - No Pavimentada a Concreto Tradicional con Pasajuntas	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: JPCP con Pasajuntas
Pavimentación - No Pavimentada a Concreto Tradicional sin Pasajuntas	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: JPCP sin Pasajuntas
Pavimentación - No Pavimentada a Losas Cortas	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: JPCP sin Pasajuntas
Pavimentación - No Pavimentada a Tratamiento Superficial	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: Tratamiento Superficial sobre base granular
Cambio Tipo de Superficie - Tratamiento Superficial a Asfalto	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: Mezcla Asfáltica sobre base granular
Cambio Tipo de Superficie - Tratamiento Superficial a Concreto Tradicional con Pasajuntas	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: JPCP con Pasajuntas
Cambio Tipo de Superficie - Tratamiento Superficial a Concreto Tradicional sin Pasajuntas	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: JPCP sin Pasajuntas
Cambio Tipo de Superficie - Tratamiento Superficial a Losas Cortas	Modernización	Nuevo Tipo de Pavimento: JPCP sin Pasajuntas
Ampliación Doble Calzada	Adición de Carril	Nuevo Tipo de Pavimento: Mezcla Asfáltica sobre base granular Ancho después de los Trabajos: 14 m Tipo de Velocidad/Capacidad: Carretera 4 carriles (2 carriles por sentido)
Ensachamiento de Calzada Asfáltica	Ensanchamiento Parcial	Nuevo Tipo de Pavimento: Mezcla Asfáltica sobre base granular Ancho después de los Trabajos: 7,2 m Tipo de Velocidad/Capacidad: Carretera Bidireccional (ancha)
Rectificación Geométrica	Rectificación	Nuevo Tipo de Pavimento: Mezcla Asfáltica sobre base granular Factor de Ajuste de Longitud: 0.9 Proporción Nueva Construcción: 0.3

Descripción	Tipo de Mejora	Diseño
Reconstrucción de Pavimento Asfáltico	Reconstrucción	Nuevo Tipo de Pavimento: Mezcla Asfáltica sobre base granular Material Superficial: Concreto Asfáltico SNP: 3.5 (in) Espesor Superficial: 50 mm Compactación Relativa: 97%

4.1.3.1 Valor Residual

Según el “Análisis del costo del ciclo de vida: Una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas en pavimentación” (ACPA, 2012), el valor residual (VR) se puede definir como:

- El valor neto del pavimento si este fuese reciclado, al cabo de su período de análisis.
- Valor remanente al final del período de análisis.
- El valor del pavimento como capa de soporte para un sobrecarpeta, al final del período de análisis.

Se recomienda que el valor residual sea un porcentaje de la inversión inicial, expresada en términos sociales (Ministerio de Desarrollo Social, 2011).

Diversos estudios indican que los pavimentos rígidos tienen un mayor valor residual que los pavimentos asfálticos (ACPA, 2012), y este último, mayor al de un tratamiento superficial.

Por ende, en la Tabla 4-4, se presentan los valores residuales propuestos para los mejoramientos del HDM-4. Estos estarán diferenciados por materialidad del camino y el tipo de vía, asumiendo que las vías de mayor importancia deben tener un mayor valor residual. Dichos valores fueron asignados por la información recolectada de las mesas de trabajo.

Tabla 4-4 Valores Residuales de los Mejoramientos

	Valor Residual Mejoramientos [%]									
	Ensanchamiento			Pista Adicional			Rectificación / Realineamiento		Modernización (Mejoramiento)	
	Concreto*	Asfalto	Tratamiento Superficial	Concreto* Tradicional / Losas Cortas	Asfalto	Tratamiento Superficial	Concreto*	Asfalto	Concreto	Asfalto
Centroamericanas, CA	80	70	-	85	80	-	85	75	80	75
Nacionales, RN	80	75	-	80	75	70	80	70	80	70
Departamentales, RD	75	65	60	75	65	-	80	70	75	65
Departamentales terciarias, Camino rural, CR	70	65	60	70	65	60	70	65	70	65

Fuente: Elaboración Propia

Nota: * Si el pavimento a realizar un mejoramiento, es de hormigón, deberá ingresar el tramo en la red de carreteras como un pavimento asfáltico y realizar el respectivo mejoramiento, pero como una modernización del tipo: Cambio de estándar de Pavimento Asfáltico a Hormigón. Dentro del cambio de estándar debe ingresar las consideraciones cómo si hubiese realizado un ensanchamiento, pista adicional o rectificación.

4.1.4 Tramos de Construcción Nueva

Dentro del Módulo de Estándares de Trabajo, existe un tercer tipo de trabajo, denominado “Tramos de Construcción Nueva”. Este permite realizar proyectos de construcción en sectores donde no existe camino, tales como by pass o abrir huella de camino.

La interfaz de los tramos de construcción nueva es idéntica a la de un tramo de la red de carretera, el cual en el siguiente capítulo se describirá. Los tramos nuevos se diferencian de un tramo de la red de carreteras, en que la nueva construcción considera una pestaña con los costos que relacionados a la construcción.

Dado que los tramos nuevos, dependen únicamente del diseño mismo de la carretera, se crean en el object, estructuras representativas según sea el volumen de tránsito. No existen umbrales que permitan determinar cuándo realizar un nuevo camino, sino que el programa lo desarrolla como una decisión exógena de una red o más bien política.

4.1.4.1 Valor Residual

Para los Tramos Nuevos, se proponen los siguientes valores de Valor Residual, visualizados en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Valores Residuales de los Tramos Nuevos (%)

	Hormigón Tradicional / Losa Corta	Asfalto	Tratamiento Superficial	Grava
Centroamericanas, CA	95	90	-	-
Nacionales, RN	85	80	-	-
Departamentales, RD	80	70	65	50
Departamentales terciarias, Camino rural, CR	80	70	55	50

Fuente: Elaboración Propia

5 IMPLEMENTACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL HDM-4

5.1 Red de Carreteras

En HDM-4, en el módulo de red de carreteras es donde define las características de los tramos de carreteras a analizar. Una red de carreteras en el HDM-4 almacena los detalles de las rutas que desea analizar. Cada red de carreteras está constituida por diversos tramos viales (pavimentados o no pavimentados, estructuras diversas, etc). Un tramo normalmente corresponde a un segmento de carretera, pero también puede ser un tramo 'representativo', creado exclusivamente a efectos del análisis.

El HDM-4 usa el concepto de 'tramos homogéneos', donde cada tramo tiene una resistencia, geometría, tráfico y características de condición uniformes en toda su longitud.

Una red de carreteras está asociada a una serie de calibración que define coeficientes de calibración para el rango de tipos de pavimento encontrados en la red. Los tramos con características semejantes pueden usar la misma calibración.

Cada red de carreteras está asociada a una flota vehicular en particular. En la red de carreteras solamente basta definir el TMDA del tráfico para cada tramo o sección.

Es por ello, que es en la red de carreteras, la configuración previamente cargada en los módulos de configuración y flota, encuentran su utilidad. Por ende, en este módulo de HDM-4, no existe calibración de los parámetros, sino que se emplea la información recolectada.

Dado que en la red de carreteras, se ingresa la información representativa del estado actual de los tramos de la red, de manera simplista y de fácil comprensión, podríamos hablar que la tramos de la red serían como la *"alternativa base sin proyecto"*.

5.2 Red de Carreteras de Guatemala

Para la red de carreteras de Guatemala se definieron según las rutas registradas en la página de la Dirección general de caminos (Caminos, 2022). Debido a la gran cantidad de rutas registradas se escogieron las rutas Centroamericanas y Nacionales para completar el módulo de la red.

Debido a la falta de información del estado y las características geométricas de cada ruta se establecieron algunos parámetros generales para las rutas según su clasificación y tipo de pavimento.

Del Plan de desarrollo vial 2018-2032 (Mcrit & Disystems, 2018) se tomaron algunos valores de la sección transversal según la tabla 9. Criterios de diseño del PVD 2018 -2032. Adicionalmente según la ubicación de las rutas se asignó el clima que se consideró predomina según las regiones definidas.

Cabe resaltar que los valores fueron definidos según generalidades de la tipología de vía, por lo tanto se debe actualizar los parámetros que se consideren necesarios para que se ajusten a las condiciones reales de los proyectos a evaluar.

5.3 Herramientas de Análisis

HDM-4, tiene tres modalidades para análisis los proyectos: Análisis de Proyectos, Análisis de Programa y Análisis de Estrategia, donde cada uno se pueda adaptar en los diversos análisis en la gestión de carreteras.

En las herramientas de análisis, es donde se debe ingresar, para cada tramo de la red de carreteras a analizar, los siguientes parámetros:

- Tasa de Crecimiento de la Flota
- Alternativas de Conservación y Mejora

Mientras que el período de análisis y tasa de descuento es representativo para todos los tramos de la red a analizar. También es en estas herramientas donde se deben ingresar los costos por accidentes. En los Anexos B y C, se explica cómo utilizar estas herramientas para realizar los respectivos análisis.

5.3.1 Análisis de Proyecto

El análisis de proyecto se encuentra relacionado a la evaluación de proyectos de carreteras y sus opciones de inversión. Para ello el software analiza cada tramo de la red con los respectivos estándares seleccionados para el tramo, con sus costos y beneficios, los cuales proyectan hasta el final del período de análisis.

El análisis de proyecto permite estimar la viabilidad técnica y económica de los proyectos viales.

Por otro lado, el análisis de proyecto se diferencia del análisis por estrategia y de programa, los análisis de proyecto deben existir cierto nivel de detalle en los datos, mientras que los análisis por estrategia o programa, los valores son más genéricos o representativos. De allí que los análisis de proyectos debiesen de utilizar valores de auscultaciones realizadas en el tramo, pero para el análisis de estrategia y de programa bastaría con caracterizar el tramo como bueno, regular o malo.

Es en esta herramienta, donde los planes de preinversión e inversión se deben evaluar. Ya sea de pavimentación de vías, by-pass, conservación de caminos, etc.

En los Anexos B y C, se entregan las propuestas de manuales de capacitación de HDM-4, a través de la herramienta de análisis Proyecto. El Anexo C, es un manual simplificado para la utilización de HDM-4, mientras que el Anexo B, presenta mayor detalle en cuanto a ingreso de tasas de crecimiento, análisis de by-pass, ingreso de los trabajos a realizar en los tramos, ingreso de costos de accidentes, etc.

5.3.2 Análisis de Estrategia

A diferencia del análisis por proyecto, el cual se analiza cada tramo de manera particular, el análisis de estrategia requiere tener en cuenta las necesidades de toda la red.

Por ello, el análisis por estrategia abarca a la red completa o subredes de esta, que se encuentran gestionadas por una única entidad. De allí, que entidades como Dirección Vial, el cual debe mantener el patrimonio vial del país, les es útil realizar análisis de toda la red nacional, a través de esta herramienta.

Dado que, en un análisis de toda la red de caminos, resulta difícil de subdividir en tramos particulares, ya que la entidad debe velar por varios miles de kilómetros. Por ende, los usuarios pueden definir parámetros representativos de los factores que más afectan a los costos del transporte.

El análisis por estrategia permite realizar estimaciones a mediano y largo plazo, de las conservaciones y desarrollo de las carreteras de toda la red, bajo diferentes supuestos de presupuesto.

5.3.3 Análisis de Programa

Este tipo de análisis asigna prioridades a una lista de proyectos de carreteras, bajo restricciones presupuestarias. Esta lista de proyectos, son analizados de manera discreta dentro de la red.

El análisis de programa se diferencia del análisis por estrategia, en que el análisis de programa realiza sus modelaciones sobre los tramos de manera individual. Mientras, en el análisis por estrategia, los tramos pierden sus características individuales, para ser agrupados en segmentos cuyos elementos más pequeños tienen características similares.

Ya sea para análisis por estrategia o por programas, en ambos la resolución del problema se plantea en la búsqueda de la combinación de alternativas que optimizan una función objetivo, como puede ser maximizar el VAN o minimizar el valor IRI de la red.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las actividades que se han realizado en conjunto con el consultor y las entidades competentes trae como resultado la posibilidad de aprovechar la herramienta de gestión conocida como HDM-4 como mecanismo de soporte para la toma de decisiones en infraestructura vial, cumpliendo con el objetivo de contar con un archivo “object maestro” que cuenta con la configuración y parametrización acorde a las condiciones de Guatemala, el cual facilita un apropiado manejo y estandarización en el uso del software en el contexto de la evaluación de iniciativas de inversión para proyectos de infraestructura vial en el país.

Para definir los valores y rangos que establecieran una base sólida para la creación del archivo se contó con la participación de varios especialistas con experiencia en varios campos de la infraestructura vial en Guatemala, los cuales asistieron a mesas de trabajo para conversar y discutir sobre diferentes temas que fueron tratados en los talleres respectivos. Dichos talleres fueron encaminados con el fin de validar y obtener información que permitieran definir los diferentes parámetros que solicita el HDM-4. La información recolectada sirvió para definir y confirmar algunos parámetros de los cuales no se tiene información citada en documentos especializados aplicados a las condiciones de Guatemala, y que fueron la base para definir el mejor valor que representara las condiciones locales junto con la experiencia del consultor y normativas internacionales. Adicionalmente, la creación del archivo HDM-4 fue elaborado con base en lo expuesto en las normativas utilizadas en los proyectos viales de Guatemala y con información de documentos oficiales encontrados en la web por entidades públicas.

El “Objeto maestro” presentado se realizó con el fin de cubrir los casos que típicamente deben ser evaluados dentro del contexto del país, según se tratara de una evaluación a nivel de perfil preliminar o de una evaluación de factibilidad e ingeniería más detallada.

6.1 Conclusiones

A partir del trabajo de configuración y parametrización del HDM-4 para el caso específico de Guatemala dentro del marco de aplicación de la herramienta en la evaluación de proyectos de inversión de iniciativas de infraestructura vial, a continuación, se presentan las conclusiones particulares que entrega el estudio realizado:

- El estudio entrega propuestas de relaciones de capacidad y velocidad así como modelos de tráfico, teniendo en cuenta que no existen estudios específicos aplicados a las situaciones de Guatemala, se consolidaron varios escenarios para cubrir las posibles situaciones que pueden caracterizar un proyecto y que permitan hacer más sensible y representativa la distribución de los flujos y la identificación de situaciones críticas dentro de dicha representación, de modo de contemplar y considerar el efecto del congestionamiento en determinados periodos de operación de los segmentos viales objeto de estudio.
- El estudio entrega tres categorías de flota vehicular que se diferencian en costos económicos unitarios los cuales se diferencian por valores máximos y mínimos que podrían encontrarse según las zonas evaluadas. Adicionalmente la flota define y parametriza los vehículos tipo con los cuales se caracteriza un estudio de tránsito en

Guatemala, que fueron parametrizados según valores precargados del HDM-4, la recopilación de información de las mesas de trabajo y la experiencia del consultor.

- La parametrización propuesta incluye en la definición de los estándares de mantenimiento los correspondientes criterios de aplicación diseño, precios unitarios y efectos esperados posterior a su aplicación en el caso. Asimismo, se han sugerido los respectivos aspectos correspondientes a los criterios de aplicación (incluyendo frecuencias de aplicación y umbrales), diseño, precios unitarios, así como los efectos esperados, posterior a su aplicación.
- Las series de calibración que permiten determinar el deterioro del pavimento en base a modelos que son definidos a partir de factores de calibración definidos para cada tipo de deterioro, fueron definidos bajo los posibles casos que pudieran presentarse en Guatemala, conformando un conjunto de juegos de calibración, cuyos factores de calibración K_{ij} quedaron alimentados con valores ($K_{ij}=1$) debido a la falta de estudios específicos respecto a las condiciones reales de Guatemala. Cabe aclarar que dichos valores deben ser actualizados en base a estudios adicionales para así mismo mejorar los modelos que caracterizan el comportamiento de los pavimentos en Guatemala según las condiciones locales.
- Dentro del “Object Maestro” se ha definido en la red de carreteras las rutas Centroamericanas y Nacionales presentes en Guatemala, que fueron cargadas con información general según la clasificación vial y tipo de pavimento, esto con el fin de facilitar la creación de tramos en la evaluación de proyectos. Cabe resaltar que las características deben ser actualizadas según las condiciones reales de los proyectos a evaluar ya que actualmente presentan condiciones generales que podrían diferenciarse en gran medida a la situación específica de los proyectos a analizar.

6.2 Recomendaciones

A continuación, se sugiere un conjunto de Recomendaciones Técnicas que faciliten a futuro plantear nuevos desafíos a corto y mediano plazo, así como facilitar su implementación y utilización por parte de los distintos actores partícipes de la evaluación de proyectos viales .

- Algunos parámetros definidos en los módulos del HDM-4 fueron caracterizados con valores generales o precargados del HDM-4, por lo cual se aclara que esta es una versión preliminar que se puede mejorar, las cual se recomienda actualizar mediante estudios específicos a las condiciones locales de Guatemala.
- En cuanto a los temas concernientes a accidentalidad y seguridad vial en el HDM-4, se sugiere evaluar los datos existentes con el fin de refinar la situación y mejorar los protocolos de análisis de este ítem mediante el uso de HDM-4.
- Es importante planificar un plan de difusión y capacitación de los resultados incluidos en el presente informe y el “Object Maestro” que aseguren su aplicación y faciliten su implementación y adopción por parte de los actores y entidades involucradas en la evaluación de proyectos e iniciativas de inversión en infraestructura vial.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ACPA, 2012. *Análisis del costo del ciclo de vida*. s.l.:s.n.
- AECID & Ministerio de Asunto Exteriores y de Cooperación, 2011. *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras*. España: s.n.
- Caminos, D. d., 2022. *Manual DGC Caminos-Estadística Vehicular*. Guatemala: s.n.
- Caminos, D. G. d., 1992. *Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores y sus combinaciones*. Guatemala: s.n.
- CAMINOS, D. G. D., 2002. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: s.n.
- Caminos, D. g. d., 2022. <https://caminos.gob.gt/rutas-registradas.html>. [En línea] [Último acceso: 1 Septiembre 2022].
- Castellanos, P. y otros, 2018. Escenarios de aridez para Guatemala para los años 2030, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático. *Yu'am Revista Mesoamericana de Biodiversidad y cambio climático*, p. 13.
- CEPREDENAC, 2010. *Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras*. Guatemala: s.n.
- IGN, I. N. G., 2022. *Mapa Red Vial de Guatemala*. Guatemala: s.n.
- Iturbide, J. C., 2002. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Guatemala: s.n.
- Kerali, H., 2001. *HDM-4, v.1*. París: s.n.
- Kerali, H. G. R., 2001. *The Highway Development and Management Series, Volume 4*. s.l.:s.n.
- Mcrit & Disystems, 2018. *Resumen Ejecutivo - Reformulación y actualización del Plan de Desarrollo Vial 2018-2032*, Guatemala: s.n.
- MOP, 2016. *Manual de Carreteras, Volumen 5*. s.l.:Gobierno de Chile.
- MOP, 2016. *Manual de Carreteras, Volumen 6*. s.l.:Gobierno de Chile.
- MOP, 2016. *Manual de Carreteras, Volumen 7*. s.l.:Gobierno de Chile.
- OECD & IRTAD, 2016. *Road Safety Annual Report 2016*. París: s.n.
- Orrego León, E. A., Hernandez Quevedo, M. P. & Gómez Jordán, R. D. C., 2021. Variabilidad del inicio, final y duración de la época lluviosa en Guatemala y su tendencia. *Yu'am Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático*, 5(1), p. 21.
- Riley, M. J., Morosiuk, G. & Odoki, J. B., 2004. *HDM-4, Volume 6*. Birmingham: s.n.
- SNIP, 2015. *Pautas Metodológicas para el Uso y Aplicación del HDM-4 en la Formulación y Evaluación Social*. Lima: s.n.