



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Vial

**“ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO EN CAMINOS DE
MONTAÑA, EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA”**

INGENIERO CIVIL ERLIN AROLDO FELIPE CHIQUITÓ

ASESORADO POR ING. MSC. DENNIS SALVADOR ARGUETA MAYORGA

GUATEMALA, JULIO DE 2014

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

**ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO EN CAMINOS DE
MONTAÑA, EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

TESIS

PRESENTADO AL COMITÉ DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL

POR

INGENIERO CIVIL ERLIN AROLDO FELIPE CHIQUITÓ
ASESORADO POR ING. MSC. DENNIS SALVADOR ARGUETA MAYORGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA VIAL

GUATEMALA, JULIO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

HONORABLE JUNTA DIRECTIVA

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Vocal II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Vocal III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
Vocal IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
Vocal V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
Secretario	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

Director	Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Coordinador	Ing. Armando Fuentes Roca
Examinador	Ing. Edvin Rolando Cardona Rivas



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Revisor de la Maestría en Ingeniería Vial del Trabajo de Tesis titulado **“ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO EN CAMINOS DE MONTAÑA, EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA”**. Presentado por el Ingeniero Civil **Erlin Aroldo Felipe Chiquitó**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, julio de 2014.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Coordinador de la Maestría en Ingeniería Vial y revisor del Trabajo de Tesis titulado **“ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE TRAZADO EN CAMINOS DE MONTAÑA”**, presentado por el Ingeniero Civil **Erlin Aroldo Felipe Chiquitó** apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, julio de 2014.

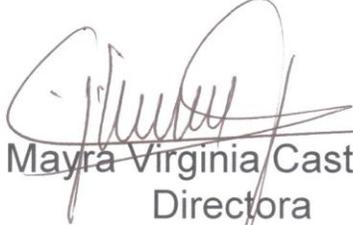
Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **“ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO EN CAMINOS DE MONTAÑA, EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Civil **Erlin Aroldo Felipe Chiquitó** apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, julio de 2014.

Cc: archivo
/la



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Ingeniería en Ingeniería Vial titulado: **“ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO EN CAMINOS DE MONTAÑA, EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA”**, presentado por el Ingeniero Civil **Erlin Aroldo Felipe Chiquitó**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, julio de 2014.

ÍNDICE GENERAL

Índice de ilustraciones	V
Índice de tablas.....	VII
Lista de símbolos.....	IX
Glosario.....	XI
Resumen.....	XIII
Planteamiento del problema y formulación de preguntas orientadoras...	XV
Objetivos e hipótesis.....	XVII
Resumen del marco metodológico.....	XIX
Introducción.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO	
1.1. La seguridad en las normas de diseño geométrico.....	1
1.2. Origen del concepto de la velocidad de diseño.....	3
1.3. Uso actual de la velocidad de diseño.....	3
1.4. Influencia de la velocidad de operación.....	4
1.5. Disparidad entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación.....	10
1.6. Crítica al proceso de selección de la velocidad de diseño.....	12
1.6.1. Proceso de selección de la velocidad de diseño.....	12
1.6.1.1. Clasificación funcional, según normas centroamericanas.....	12
1.6.1.2. Tipo de zona.....	13

1.6.1.3.	Topografía.....	14
1.7.	Enfoques para evaluar la consistencia del trazado.....	15
1.7.1.	Enfoque de homogeneidad geométrica.....	15
1.7.2.	Enfoque de Polus.....	17
1.7.3.	Enfoque basado en la carga de trabajo del conductor.....	20
1.7.4.	Enfoque de Lamm.....	23
1.8.	Indicadores propuestos basados en velocidad por Lamm et al. (1999).....	24
1.9.	Criterios para la evaluación de consistencia, propuestos por Lamm et al. (1999).....	25

2. DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PREDICCIÓN DE VELOCIDADES, EN CURVAS HORIZONTALES

2.1.	Relación: Velocidad – Geometría.....	27
2.2.	Área de muestreo.....	27
2.2.1.	Ubicación.....	28
2.2.2.	Orografía.....	28
2.2.3.	Carreteras bidireccionales.....	29
2.3.	Análisis de las carreteras del área.....	30
2.4.	Toma de datos.....	33
2.4.1.	Factores no relacionados con la geometría.....	33
2.4.2.	Parámetros fijos que se deben medir del trazado.....	33
2.4.3.	Datos de las características geométricas del trazado.....	34
2.4.4.	Tamaño mínimo de la muestra de curvas horizontales.....	35
2.4.5.	Parámetros fijos que se deben medir de la	

	velocidad.....	40
	2.4.5.1. Velocidad de diseño.....	40
	2.4.5.2. Velocidad del percentil 85.....	40
	2.4.5.3. Velocidad deseada.....	40
	2.4.6. Datos de la velocidad de operación.....	40
	2.4.7. Tamaño de la muestra de velocidad de operación.....	41
2.5.	Procesamiento estadístico.....	43
2.6.	Análisis de resultados.....	46
3.	VALIDACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO	
3.1.	Información del departamento.....	49
3.2.	Información de la ruta seleccionada.....	50
3.3.	Ecuaciones validadas.....	51
	3.3.1. Variables independientes de velocidad.....	53
	3.3.2. Variables independientes geométricas.....	53
3.4.	Velocidad de operación estimada con modelos.....	54
	3.4.1. Velocidad de operación en curvas horizontales..	54
	3.4.2. Velocidad de operación en tangentes.....	55
3.5.	Velocidades medidas de operación.....	60
3.6.	Perfil de velocidades.....	62
	3.6.1. Perfil de velocidades estimadas.....	62
	3.6.2. Perfil de velocidades medidas.....	63
3.7.	Comparativa velocidad estimada vs. velocidad medida...	63
3.8.	Análisis estadístico.....	65
3.9.	Conclusiones obtenidas de los resultados.....	68
4.	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO	

4.1.	Área para el análisis de consistencia.....	69
4.2.	Información de la ruta seleccionada.....	70
4.3.	Aplicación práctica del modelo desarrollado.....	71
4.3.1.	Velocidad de operación en curvas horizontales.....	71
4.3.2.	Velocidad de diseño y velocidad deseada.....	72
4.3.3.	Velocidad de operación en tangentes.....	73
4.3.4.	Resultados del criterio de seguridad I.....	76
4.3.5.	Resultados del criterio de seguridad II.....	78
4.4.	Perfil del análisis de consistencia.....	83
4.5.	Evaluación de consistencia del trazado.....	84
4.6.	Análisis de resultados.....	84
CONCLUSIONES.....		87
RECOMENDACIONES.....		91
BIBLIOGRAFÍA.....		93
ANEXOS.....		97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Página
1.1. Velocidad del percentil 85 para una distribución normal.....	6
1.2. Distribución de la velocidad del percentil 85 en tangente de una vía urbana y suburbana por clase funcional.....	7
1.3. Perfil de velocidad de la velocidad del percentil 85 y la velocidad de diseño.....	11
1.4. Clasificación funcional de un sistema vial.....	13
1.5. (a) ejemplo de un segmento de carretera; (b) ejemplo de un perfil de velocidad.....	19
1.6. Relación entre la carga de trabajo del conductor, las características de la carretera y las operaciones de vehículos....	21
1.7. Ruta Centroamericana 14, Baja Verapaz, Guatemala.....	21
1.8. Ruta Centroamericana 1, Patzicía, Guatemala.....	22
2.1. Mapa del departamento de Baja Verapaz.....	28
2.2. Mapa de la red vial del departamento de Baja Verapaz.....	31
2.3. Restitución en planta, cumbre de Santa Elena, Baja Verapaz....	35
2.4. Restitución en elevación, utilizando estación total.....	38
2.5. Perfil típico de una curva horizontal.....	39
2.6. Medición de velocidades del tramo Niño Perdido - La Unión Barrios.....	43
2.7. Ajuste de la solución.....	44
2.8. Velocidad observada vs. velocidad pronosticada (-9% - 9%).....	45
2.9. Error residual.....	45
2.10. Relaciones velocidad - geometría especificación de la DGC.....	47
2.11. Comparativa velocidad – geometría, especificación de la DGC y especificaciones de la SIECA.....	47
3.1. Mapa del departamento de Sacatepéquez.....	50
3.2. Imagen satelital tramo Alotenango – Las Lajas.....	51

3.3.	Perfil de velocidad medida y perfil de velocidad estimada.....	63
3.4.	Velocidad medida vs velocidad estimada (Terreno llano).....	64
3.5.	Velocidad medida vs velocidad estimada (Terreno montañoso)..	64
4.1.	Mapa del departamento de Sololá.....	69
4.2.	Imagen satelital tramo San Gabriel – Santa Alicia.....	70
4.3.	Perfil consistencia del trazado.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
1.1. Ecuaciones para predicción de velocidades de Fitzpatrick et al.....	9
1.2. Notas de ecuaciones de Fitzpatrick et al.....	10
1.3. Cambio de curvatura TCC.....	15
1.4. Umbrales de Lamm et al. (1999).....	16
1.5. Índices de alineamiento.....	17
1.6. Indicadores y umbrales de Lamm et al.....	26
2.1. Fisiografía a nivel de gran paisaje, Baja Verapaz.....	29
2.2. Caminos por tipo de rodadura de Baja Verapaz.....	30
2.3. Nomenclatura para las rutas, de la DGC.....	31
2.4. Clasificación de carreteras, según funcionalidad, Baja Verapaz.....	32
2.5. Variables consideradas para modelos de predicción de velocidades.....	34
2.6. Clasificación de las curvas horizontales por radios según intervalos propuesto por la DGC.....	37
2.7. Clasificación de las curvas horizontales por elevación según intervalos propuestos por Fitzpatrick et al (2000).....	39
2.8. Modelos de predicción de velocidades de operación en curvas horizontales.....	46
3.1. Modelos de velocidad propuesto para caminos de montaña en Guatemala.....	52
3.2. Variables independientes de velocidad en km/h.....	53
3.3. Variables independientes geométricas en m.....	53
3.4. V85 estimado y V85 medido, RN-14 Sacatepéquez.....	61
3.5. Prueba de homogeneidad de varianzas (Terreno llano).....	66

3.6.	Descriptivos (Terreno llano).....	66
3.7.	ANOVA (Terreno llano).....	66
3.8.	Prueba de homogeneidad de varianzas (Terreno montañoso)....	67
3.9.	Descriptivos (Terreno montañoso).....	67
3.10.	ANOVA (Terreno montañoso).....	67
4.1.	Clasificación del criterio de diseño I.....	77
4.2.	Clasificación del criterio de seguridad II.....	79
4.3.	Datos numéricos para el proceso de evaluación de seguridad....	81
4.4.	Resumen de la evaluación de la consistencia.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleración (m/seg ²)
CCRS	Tasa de cambio de curvatura de la curva circular simple con curvas de transición (°/km)
G ^o	Grado de Curvatura (°/100m)
e	Tasa peralte (%)
P	Pendiente longitudinal (%)
L	Longitud de curva o sección (m)
L _C	Longitud de curva circular (m)
L _T	Longitud de tangente (m)
L _S	Longitud de clotoide (m)
L _{Tmax}	Longitud necesaria de aceleración/desaceleración para alcanzar la velocidad deseada entre curvas n-1 y n+1 (m)
L _{Tmin}	Longitud necesaria de aceleración/desaceleración entre curvas n-1 y n+1 (m)
V _d	Velocidad de diseño (km/h)
V _{des}	Velocidad deseada es la máxima velocidad de operación del percentil 85 en tangente y curvas (km/h)
V ₈₅	Velocidad de operación del percentil 85 de vehículos livianos en flujo libre (km/h)
V _{85T}	Velocidad de operación del percentil 85 en tangente
V _{85C}	Velocidad de operación del percentil 85 en curva
R	Radio curva circular (m)
r ²	Coefficiente de determinación (-)
ØV ₈₅	Velocidad media de operación del percentil 85 para la sección de camino observada sin considerar las tangentes.

GLOSARIO

Sitio	Se considera sitio a la agrupación de una o varias curvas de características geométricas similares de la misma condición, ya sea curva horizontal, vertical o la combinación (Fitzpatrick e al., 2000).
Condición	Es la combinación de alineación existente en las carreteras.
Clotoide de transición	Son las curvas que se intercalan desde una sección en tangente a una curva horizontal circular.
Grado de curva	Es el ángulo sustentado en el centro de un círculo de radio R por un arco de 100 pies ó de 20 metros, según el sistema de medidas utilizado.
Radio	Es el valor límite de la curvatura para una velocidad de diseño dada, que se relaciona con la sobreelevación máxima y la máxima fricción lateral escogida para diseño.
Peralte	Es la sobreelevación que se necesita cuando un vehículo viaja en una curva cerrada a una velocidad determinada, para contrarrestar las fuerzas centrífugas y el efecto adverso de la fricción que se produce entre la llanta y el pavimento.

RESUMEN

La consistencia del trazado se refiere a la situación en la cual la geometría de la carretera concuerda con las expectativas del conductor. La mayoría de métodos que evalúan la consistencia del trazado están basados en el análisis del perfil de la velocidad operación.

En la presente tesis, se desarrolla un modelo propio para la predicción de velocidades en curvas y se valida el modelo propuesto por Lamm et al. (1999), para la predicción de velocidades en tangentes, esto con el objetivo de construir el perfil de velocidades en los caminos de montaña.

Guatemala por su topografía, muchos de sus caminos son de dos carriles y están ubicados en zonas montañosas, por lo que es de suma importancia contar con una herramienta que permita evaluar la seguridad de los diseños geométricos.

El modelo que se desarrolla se validó en un departamento distinto de donde fue obtenido, con el objetivo de demostrar que es transferible y así poder utilizarlo para evaluar el nivel de seguridad en caminos de montaña a nivel nacional.

En el último capítulo se realiza un ejemplo práctico, de cómo se emplean los modelos de predicción de velocidades para evaluar la consistencia del trazado, utilizando para ello los umbrales de seguridad propuestos por Lamm et al. (1999).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

En general, el diseño geométrico de caminos debería brindar a los conductores un adecuado nivel de movilidad y acceso, además de conservar un alto grado de seguridad, lamentablemente, como lo declara el reporte de la NCHRP 504 el proceso de diseño actual no garantiza alineamientos o comportamientos del conductor coherentes a lo largo del alineamiento. (p. 1) Es decir la aplicación de las normas actuales de diseño geométrico por si solas no proveen seguridad a los alineamientos. La 6ta. edición del libro verde de la AASHTO, recomienda que la selección de la velocidad de diseño tiene que tener coherencia con la velocidad de operación, la recomendación es muy acertada, lamentablemente, en Guatemala no existen modelos calibrados para la predicción de la velocidad de operación, por ende, no puede seleccionarse una velocidad de diseño coherente con las expectativas del conductor guatemalteco.

PREGUNTA GENERAL

¿Cuál es la importancia que tiene el análisis de consistencia del trazado en caminos de montaña, para la seguridad vial de los conductores, en la república de Guatemala?

PREGUNTAS ESPECÍFICAS

1. ¿Cómo predecir la velocidad de operación en las curvas horizontales en caminos de montaña?
2. ¿Cómo determinar la transferibilidad del modelo desarrollado en otros departamentos del país?
3. ¿Cómo evaluar el nivel de seguridad del alineamiento en un camino de montaña?

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

GENERAL

- Explicar la importancia que tiene el análisis de consistencia del trazado en caminos de montaña, para la seguridad vial de los conductores en la república de Guatemala.

ESPECÍFICOS

1. Desarrollar una ecuación para predecir la velocidad de operación en curvas horizontales para caminos de montaña en el departamento de Baja Verapaz.
2. Validar el modelo desarrollado en Baja Verapaz en un tramo de la Ruta Nacional 14, en el departamento de Sacatepéquez.
3. Evaluar el nivel de seguridad del alineamiento en un tramo de la Ruta nacional 11, en el departamento de Sololá.

HIPÓTESIS

Es posible mediante el análisis de consistencia del trazado, evaluar el nivel de seguridad en los caminos de montaña en Guatemala.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La metodología de la investigación se dividió en cuatro fases, cada fase posee sus propias técnicas de análisis de información las cuales se presentan a continuación.

Fase 1: Se construyó el marco teórico del tema investigado.

Técnicas: La búsqueda de información se organizó en dos sub-fases. La primera, consistió en una búsqueda sistemática de información bibliográfica en Internet, Bibliotecas e instituciones públicas relacionadas con el tema tratado, con esta metodología se accedió a numerosos documentos publicados sobre el tema. La segunda sub-fase consistió en una búsqueda derivada, es decir, una vez localizados los documentos de interés para la investigación, se localizaron nuevas referencias bibliográficas mediante las bibliografías de los documentos consultados.

Instrumentos: Computadora.

Actividades: Búsqueda de información.

Fase 2: Se desarrolló un modelo para la predicción de velocidades de operación en curvas horizontales.

Técnicas: El modelo para la predicción de velocidades de operación para caminos de montaña, se obtuvo con la aplicación de técnicas de regresión por medio del programa Eureka 0.99.8.

Instrumentos: Computadora, vehículo, GPS, estación total, cámara y pistolas radar.

Actividades: Se analizaron las carreteras del departamento; de Baja Verapaz y se definieron los parámetros que se deben medir; se restituyó el trazado en planta de las rutas seleccionadas; se

clasificaron las curvas horizontales por su trazado en planta; se realizó un recorrido de reconocimiento por el tramo para determinar cuáles curvas no son aptas para el muestreo; se realizó el levantamiento topográfico de las curvas en donde se midieron las velocidades; se clasificaron las curvas horizontales por su trazado en elevación; se determinó el tamaño mínimo de la muestra de las curvas horizontales; se determinó el tamaño mínimo de la muestra de velocidades de operación; se midieron velocidades puntuales; se determinó la velocidad del percentil 85 y, por último, se realizó la regresión utilizando el software Eureka 0.99.8.

Fase 3: Se validó el modelo desarrollado en Baja Verapaz en un tramo vial en el departamento de Sacatepéquez.

Técnicas: Para determinar si el modelo desarrollado en Baja Verapaz es transferible, se validó en un tramo vial del departamento de Sacatepéquez, se realizó una comparación de perfiles de velocidades de operación medidos vs. velocidades de operación estimadas. Esta comparación se realizó por medio de un análisis de varianza (ANOVA) de una variable para medidas repetidas.

Instrumentos: Computadora, vehículo, GPS, estación total, cámara, pistolas radar.

Actividades: Se eligió el tramo vial; se restituyó la geometría de la vía; se midieron las velocidades de operación; se estimó la velocidad de operación por medio del modelo desarrollado; se construyó el perfil de velocidades del tramo y, por último, se comparó el perfil de velocidades de operación medido vs el estimado.

Fase 4: Se analizó la consistencia del trazado de un tramo vial del departamento de Sololá.

Técnica: El análisis de consistencia del trazado se realizó atendiendo a dos de los tres criterios propuestos por Lamm et al. (1999). El primer criterio de seguridad comparó la velocidad de operación con la velocidad de diseño para cada sitio y, el segundo criterio de seguridad evaluó la diferencia de velocidades de operación entre elementos sucesivos. Ambos poseen sus propios intervalos de calificación que van desde pobre a bueno.

Instrumentos: Computadora.

Actividades: Se restituyó la geometría del tramo vial; se estimó la velocidad de diseño; se estimó la velocidad de operación; se aplicó el primer criterio de seguridad; se aplicó el segundo criterio de seguridad y se analizó la consistencia del trazado del tramo vial seleccionado.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala las vías de doble sentido, en áreas rurales con topografía montañosa tienden a estar diseñadas con normas límite, debido a los altos costos que conlleva un diseño generoso en este tipo de terrenos, el uso de elementos de diseño geométrico por debajo de las expectativas del conductor hace que este tipo de carreteras sean más inseguras que los caminos en terreno llano u ondulado, donde la topografía del terreno permite al proyectista lograr un diseño generoso sin mayores dificultades.

Actualmente la seguridad vial es un tema muy importante en la planificación de tramos nuevos y en el mejoramiento de tramos viejos, para realizar una intervención adecuada y basada en datos, cualitativamente, comprobados; es necesario conocer al conductor guatemalteco. Mucho ha cambiado desde que fueron construidas las primeras carreteras en el país, los estándares son distintos, los vehículos evolucionaron, la generación de conductores es distinta, etc.

El problema de la seguridad vial en las carreteras ha sido abordado por varios investigadores en todo el mundo, cada uno con un enfoque distinto, pero, la mayoría de ellos tienen algo en común y es que utilizan el perfil de velocidades de operación como herramienta para evaluar la seguridad de un alineamiento, ahora bien, para su construcción utilizan distintas metodologías, pero, una de las más utilizadas es el conjunto de ecuaciones generadas, por Fitzpatrick et al. (2000) las cuales predicen la velocidad en curvas horizontales y en tangentes.

La mayoría de los estudios desarrollados en otros países se enfocan en caminos llanos, este tipo de terrenos contrasta con la realidad de

Guatemala en donde la mayoría de caminos bidireccionales están ubicados en terrenos montañosos, por lo que este estudio se enfocará en este tipo de carreteras.

En la presente investigación se desarrolló una ecuación que predice la velocidad en curvas horizontales y se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Lamm et al. (1999), para la predicción de velocidades en tangentes.

Capítulo 1: Se realizó un breve análisis de los antecedentes del diseño geométrico de carreteras, para poder comprender cómo se establecieron los primeros parámetros para las normas de diseño geométrico y hacia dónde se dirige el diseño geométrico actual.

Capítulo 2: Se desarrolló una ecuación para predecir velocidades en las curvas horizontales en el departamento de Baja Verapaz, específicamente, en la Ruta Centroamericana 14 y Ruta nacional 17, la elección de este departamento fue por su topografía y ubicación.

Capítulo 3: Se validó el modelo desarrollada en Baja Verapaz en la Ruta Nacional 14 en el Departamento de Sacatepéquez, para determinar si el modelo es transferible a otras zonas del país. La selección de este departamento para validar el modelo desarrollado fue a que se encuentra alejado del departamento en donde se generó el modelo.

Capítulo 4: Se realizó la evaluación de la consistencia del alineamiento de un tramo de la Ruta Nacional 11 ubicado en el departamento de Sololá, para demostrar la aplicación práctica del modelo desarrollado.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1. La seguridad en las normas de diseño geométrico.

Según Hauer, E. (2000), “los proyectistas viales tienen demasiada confianza en los comités que formulan y mejoran las normas de diseño geométrico, sin saber que muchas de las hipótesis sobre las que se basan no están bien fundamentadas” a continuación se presentan tres anécdotas que él analizó.

Primera anécdota: La elección del ancho de calzada, inicialmente, se basó en la conjetura de que los conductores viraban a la derecha cuando veían venir un vehículo en sentido contrario lo que generó el paradigma de que a mayor separación entre vehículos opuestos, significaba una mayor seguridad, es decir, las primeras especificaciones para el diseño geométrico de la AASHO se basaron en un comportamiento de conducción y no sobre la seguridad vial (Hauer, E., 2000, pág. 12).

Segunda anécdota: El procedimiento desarrollado para el diseño de curvas horizontales no se basó sobre información de ocurrencia de accidentes, sino sobre las ciencias físico-matemáticas, el problema fundamental de esta concepción es que no incluye al conductor en ningún momento, lo que hace que el escenario previsto no concuerde con la realidad. La fricción lateral y el peralte, son parte de este paradigma, pero lo que han observado varios investigadores es que no todos los vehículos que se accidentan en una curva salen por la parte externa de la curva, sino que muchos de ellos salen por la parte interna, es decir, no es un problema de fricción sino que se debe a que el conductor no tiene la suficiente visibilidad para advertir que viene en el alineamiento.

La seguridad en las curvas horizontales no debería ser muy diferente que las secciones rectas del camino, pero investigadores alrededor del mundo demostraron que los choques en estos elemento son más frecuentes que en las rectas (Hauer, E., 2000, pág. 16). En Guatemala este efecto se agudiza debido a que para el trazado de los caminos de montaña, generalmente, se utilizan los radios mínimos seguros, según lo recomendado por la normas centroamericanas.

Tercera anécdota: El elemento fundamental en el trazo de las curvas verticales es la distancia de visibilidad de detención, la cual depende del tiempo de reacción, la fricción, altura de los ojos del conductor y la altura del objeto, al igual que las curvas horizontales y el ancho del carril, en este procedimiento no se relacionó la frecuencia y la gravedad de accidentes con la elección de parábolas de diseño (Hauer, E., 2000, pág. 6).

Con estas tres anécdotas, Hauer, E., hace una dura crítica a los comités que formulan las normas de diseño, de lo que al final de su artículo se disculpa, pero el punto que él busca es hacer entender a los proyectistas viales que ninguna norma puede superar el buen criterio de un diseñador con experiencia, inclusive, recomienda que no se debe permitir diseñar a ingenieros viales que no entiendan el concepto de la seguridad vial.

El hilo conductor para la elección de los distintos elementos de un alineamiento, debe basarse en la seguridad del conductor, objetivo buscado desde un principio pero que por una u otra razón se perdió en el camino.

1.2. Origen del concepto de la velocidad de diseño.

El concepto de la velocidad de diseño ha evolucionado durante el transcurso de los años, en 1936, Barnett (p. 7), definió la velocidad de diseño como "la máxima velocidad, razonablemente, uniforme que adoptaría el grupo más rápido de conductores, una vez alejados de zonas urbanas", concepto que adoptaría la AASHO en 1938 (p. 7) realizándole una pequeña corrección "la velocidad de diseño es la velocidad máxima, aproximadamente, uniforme que, probablemente, será adoptada por el grupo más rápido de conductores, pero no, necesariamente, por el pequeño porcentaje de imprudentes". Pero no fue sino hasta la década de los 60 cuando se inició darle importancia a la verdadera velocidad de conducción con el objetivo de poder evaluar los parámetros de diseño.

1.3. Uso actual de la velocidad de diseño.

La velocidad de diseño, según la SIECA es un dato crítico en el proceso del diseño geométrico de carreteras, su selección es todo un desafío para los proyectistas sin experiencia. Con el paso del tiempo el diseño geométrico de caminos se ha vuelto a enfocar en la seguridad vial, objetivo buscado desde un principio, un claro ejemplo de esto es la evolución del concepto de la velocidad de diseño:

La SIECA (2004) definió el concepto de la velocidad de diseño como sigue:

La velocidad de diseño, también conocida como velocidad directriz, es la máxima velocidad que, en condiciones de seguridad, puede ser mantenida en una determinada sección de una carretera, cuando las

condiciones son tan favorables como para hacer prevalecer las características del diseño utilizado (p. 2-13).

Este concepto, simplemente, es una traducción del concepto que se extrae del libro verde de la AASHTO 1994, concepto que fue modificado en el año 2011, a continuación se muestra el concepto que contiene la última versión del libro verde de la AASHTO.

AASHTO (2011) definió la velocidad de diseño de la manera siguiente:

La velocidad de diseño es la velocidad seleccionada, utiliza para determinar las diversas características geométricas del camino. La velocidad de diseño seleccionada debe ser apropiada respecto de la velocidad esperada de operación, la topografía, el uso de la tierra adyacente, así como la clasificación funcional de la carretera. En la selección de la velocidad de diseño, se debe hacer todo lo posible para lograr una combinación deseada de la seguridad, la movilidad y la eficiencia dentro de las limitaciones de la calidad del medioambiente, la economía, la estética y los impactos sociales o políticos (p. 2-54).

Como puede leerse, es un concepto mucho más coherente y fácil de entender, además, menciona que la velocidad de diseño debe estar en concordancia con la velocidad de operación esperada, concepto que a continuación se amplía.

1.4. Influencia de la velocidad de operación.

La velocidad de operación como lo describe el libro verde de la AASHTO en el año 2011, tiene una gran influencia en la elección de la velocidad de diseño al punto de decir que debe ser coherente a ella, en otras palabras la elección de la velocidad de diseño depende de la velocidad de operación. El concepto de la velocidad de operación al igual que el concepto de la velocidad de diseño ha evolucionado, a continuación se presenta el concepto dado por la normativa centroamericana.

SIECA (2004) definió la velocidad de operación de la manera siguiente:

La velocidad de operación es la máxima velocidad a la cual un conductor puede viajar por una carretera dada, bajo condiciones climáticas favorables y las condiciones prevalecientes del tránsito, sin que en ningún momento se excedan los límites de seguridad que determina la velocidad de diseño, sección por sección, de dicha carretera (p. 2-12).

El concepto que se extrae de la SIECA, es muy ambiguo en comparación con el concepto que presenta la AASHTO en el año 2011, lo cual se presenta a continuación.

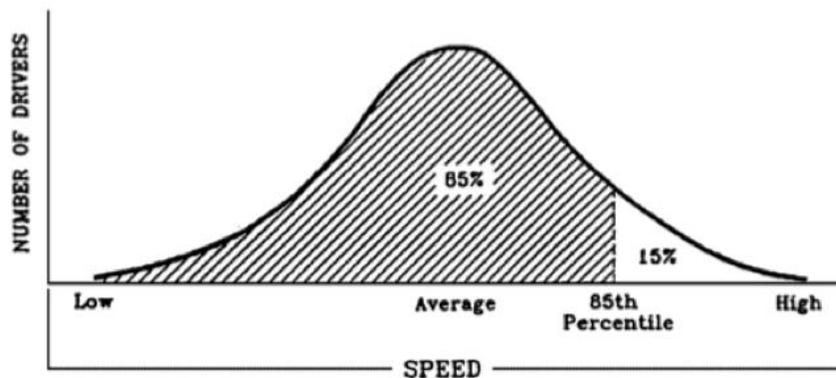
AASHTO (2011) definió la velocidad de operación de la manera siguiente:

La velocidad de operación es la velocidad a la que se observan los conductores que operan sus vehículos en condiciones de flujo libre. El percentil 85 de la distribución de las velocidades observadas es la medida utilizada con mayor frecuencia para determinar la velocidad de operación asociado a un lugar en particular o característica geométrica (p. 2-54).

El concepto que presenta la AASHTO en el 2011, es muy claro y fácil de comprender, también menciona que el percentil 85 de la distribución de las velocidades observadas es la medida más utilizada para determinar la velocidad de operación, por lo que se hace necesario ampliar un poco más el concepto de la velocidad del percentil 85.

Fitzpatrick, et al. (1995) definieron la velocidad del percentil 85 como “la velocidad por debajo del cual viaja el 85% de los conductores y, se utiliza con frecuencia para establecer los límites de velocidad” (p. 99).

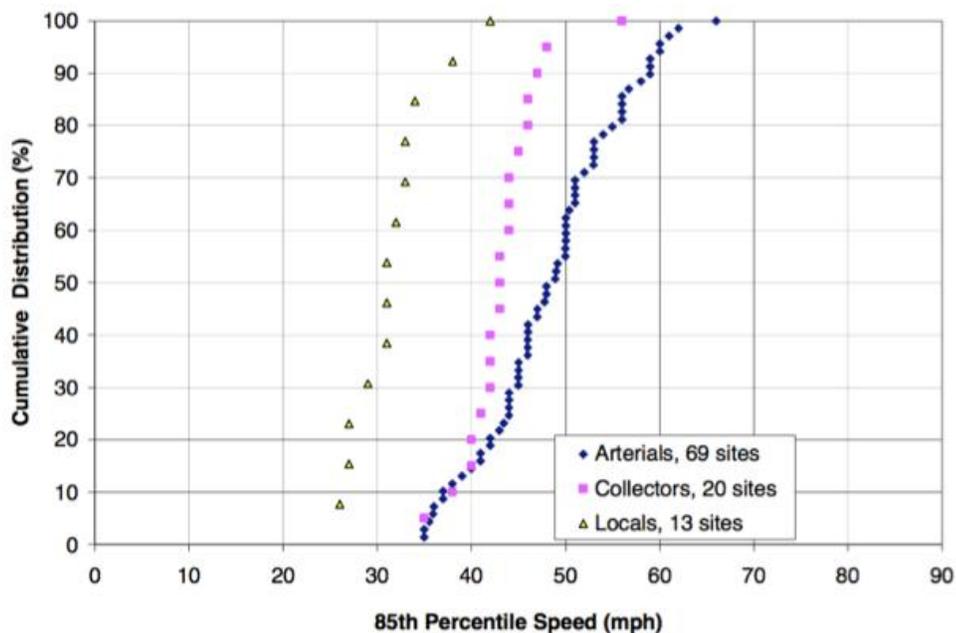
El concepto de la velocidad del percentil 85 se basa en la hipótesis de que la gran mayoría de los conductores son razonables y prudentes al manejar y que no quieren tener un accidente, además que desean llegar a su destino en el menor tiempo posible. La estadística ha demostrado que al realizar una muestra aleatoria del tránsito en un punto, se producirá una distribución de probabilidad normal (distribución de Gauss).



Fuente: Krammes, R., Fitzpatrick, K., Blaschke, J. y Fambro, D. (1996). *Speed: Understanding Design, Operating, and Posted Speed* (p. 7). Texas: Texas Transportation Institute, College Station, Report No.1465-1.

Figura 1.1. Velocidad del percentil 85 para una distribución normal.

Fitzpatrick, et al. (2002), realizaron un estudio de velocidades en áreas urbanas y suburbanas, diferenciadas por su funcionalidad (arterial, colector, local), del estudio se extrae la figura 1.2, donde puede observarse que existe un fuerte cambio de la pendiente de la frecuencia arriba del 85% y debajo del 15%, la explicación a esto es que los conductores que están por debajo del 15% de las observaciones realizadas, viajan demasiado lento y los que están arriba del 85% viajan demasiado rápido superando la velocidad, razonablemente, segura, es por esto que en muchos países se utiliza la velocidad del percentil 85 para determinar la velocidad máxima segura y los conductores que la superen son multados.



Fuente: Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M. y Wooldridge, M. (2003). *Design speed, operating speed, and posted speed limit practices* (p. 14). Prepared for 82nd Annual Meeting of Transport Research Board 2003 (p. 03-2725). Washington, D.C.: Transport Research Board.

Figura 1.2. Distribución de la velocidad del percentil 85 en tangente de una vía urbana y suburbana por clase funcional.

Al leer los tres conceptos se tiene una mejor idea de la importancia que tiene predecir la velocidad de operación, este tema fue abordado por Fitzpatrick et al. (2000) y publicándolo para la FHWA en el mismo año, en este artículo postularon que los conductores cometen menos errores cuando la geometría del alineamiento se ajustaba a sus expectativas y, para demostrarlo presentaron un conjunto de ecuaciones para predecir la velocidad en función de la geometría del camino, estas ecuaciones están clasificadas por la pendiente longitudinal la cual va desde -9% a 9% y por los distintos elementos que forman el alineamiento como: curva horizontal, curva vertical y tangente, los cuales se muestran en la tabla 1.1, con estos modelos se puede construir un perfil de velocidades a lo largo del alineamiento, el cual nos ayuda a comparar la velocidad de diseño con la velocidad de operación.

Tabla 1.1. Ecuaciones para predicción de velocidades
de Fitzpatrick et al.

AC EQ No.	Alignment Condition	Equation	No. of Obser.	R ²	MSE
1	Horizontal Curve on Grade: -9% < G < -4%	$V_{85} = 102.10 + \frac{3077.13}{R}$	21	0.58	51.95
2	Horizontal Curve on Grade: -4% < G < -0%	$V_{85} = 105.98 + \frac{3709.90}{R}$	25	0.76	28.46
3	Horizontal Curve on Grade: 0% < G < 4%	$V_{85} = 104.82 + \frac{3574.51}{R}$	25	0.76	24.34
4	Horizontal Curve on Grade: 4% < G < 9%	$V_{85} = 96.61 + \frac{2752.19}{R}$	23	0.53	52.54
5	Horizontal Curve Combined With Sag Vertical Curve	$V_{85} = 105.32 + \frac{3438.19}{R}$	25	0.92	10.47
6	Horizontal Curve Combined With Non-Limited Sight-Distance Crest Vertical Curve	(See note 3)	13	n/a	n/a
7	Horizontal Curve Combined With Limited Sight-Distance Crest Vertical Curve □ (i.e., K # 43 m/%)	$V_{85} = 103.24 + \frac{3576.51}{R}$ (see note 4)	22	0.74	20.06
8	Sag Vertical Curve on Horizontal Tangent	$V_{85} =$ assumed desired speed	7	n/a	n/a
9	Vertical Crest Curve With Non- Limited Sight Distance (i.e., K > 43 m/%) on Horizontal Tangent	$V_{85} =$ assumed desired speed	6	n/a	n/a
10	Vertical Crest Curve With Limited Sight Distance (i.e., K # 43 m/%) on Horizontal Tangent	$V_{85} = 105.08 + \frac{149.69}{K}$	9	0.60	31.10

Fuente: Fitzpatrick et al, (2000). *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highway* (p. 162).

Tabla 1.2. Notas de ecuaciones de Fitzpatrick et al.

<p>NOTES:</p> <p>AC EQ No. = Alignment Condition Equation Number</p> <p>Where:</p> <p>V85 = 85th percentile speed of passenger cars (km/h)</p> <p>K = rate of vertical curvature</p> <p>R = radius of curvature (m)</p> <p>G = grade (%)</p> <p>Use lowest speed of the speeds predicted from AC EQ No. 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ No. 3 or 4 (for the upgrade).</p> <p>In addition, check the speeds predicted from AC EQ No. 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ No. 3 or 4 (for the upgrade) and use the lowest speed. This will ensure that the speed predicted along the combined curve will not be better than if just the horizontal curve was present (i.e., that the inclusion of a limited sight-distance crest vertical curve results in a higher speed).</p>

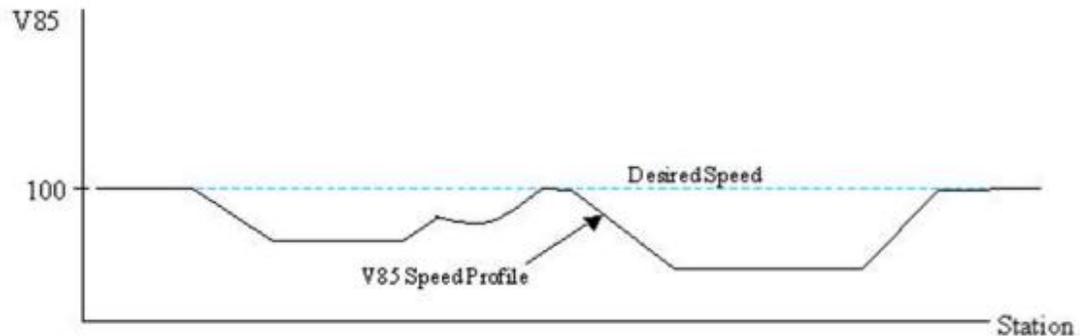
Fuente: Fitzpatrick et al, (2000). *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highway* (p. 163).

1.5. Disparidad entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación.

En el proceso de diseño geométrico de la normativa centroamericana, en ningún momento se incluye al conductor, por lo tanto, es obvio que la velocidad de diseño no coincida con la velocidad de operación, el indicarle al conductor por medio de señales verticales y horizontales la velocidad seleccionada por el proyectista no tiene ningún efecto, ya que nadie la respeta.

Cuando se tienen modelos calibrados para predecir la velocidad operación, generalmente, se utiliza el perfil de velocidad como herramienta para detectar las incoherencias entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación a lo largo del alineamiento de un tramo carretero, el concepto se presenta a continuación.

El IHSDM, (2003), define al perfil de velocidad como sigue: “Un perfil de velocidad es un gráfico de las velocidades de operación en el eje vertical frente a distancia a lo largo de la carretera en el eje horizontal” (p. 18).



Fuente: Federal Highway Administration (2003). *Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), Design Consistency Module (DCM) Engineer's Manual* (p. 8). Washington, D.C., EE. UU.

Figura 1.3. Perfil de velocidad de la velocidad del percentil 85 y la velocidad de diseño.

Antes de profundizar en el concepto de la consistencia del diseño geométrico es necesario aclarar el concepto de la velocidad deseada.

El IHSDM, (2003) define a la velocidad deseada como: “la velocidad del percentil 85 que los conductores, seleccionan cuando no están limitados por la alineación vertical u horizontal” (p. 18).

La velocidad deseada se obtiene de medir la velocidad en secciones en tangentes muy largas o curvas de gran desarrollo en donde los conductores no se vean limitados por gradientes verticales o curvas verticales.

1.6. Crítica al proceso de selección de la velocidad de diseño.

La crítica a la selección de la velocidad de diseño es que en ninguna etapa del proceso se incluye al conductor, en decir que nos olvidamos de enlazar nuestras ecuaciones con la realidad, esto no es raro como lo dice Hauer E, debido a que la cuna de los ingenieros viales es la ingeniería civil, ingeniería que no tiene el hábito de diseñar algo con el que interactúen las personas, ahora bien los ingenieros viales tienen que saber que un camino interactúa con el conductor y viceversa, es decir que, el conductor reaccionará conforme al diseño.

A continuación se describe el proceso de la selección de la velocidad de diseño propuesto por la SIECA, con el objetivo demostrar que en ninguna etapa se incluye al conductor.

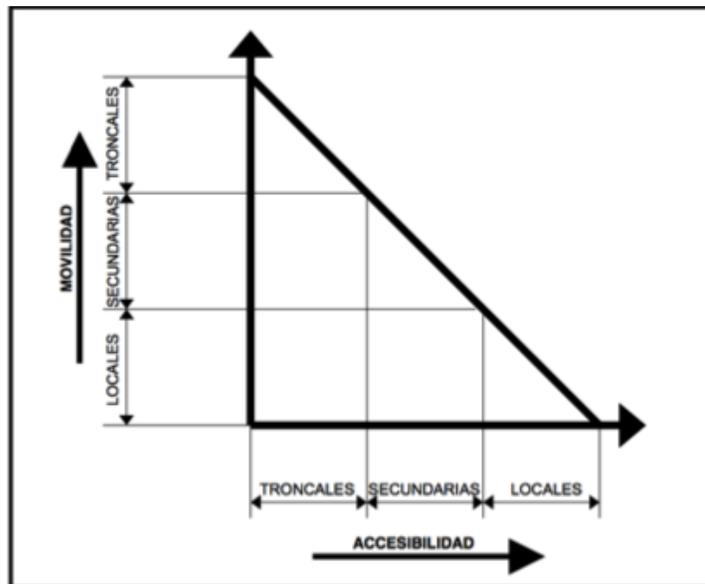
1.6.1. Proceso de selección de la velocidad de diseño.

El proceso propuesto por la SIECA para diseñar un camino inicia por la selección de la velocidad de diseño y, los factores usados para seleccionarla son: La clasificación funcional, zona y topografía, conceptos que se amplían a continuación:

1.6.1.1. Clasificación funcional, según normas centroamericanas.

La clasificación funcional agrupa las carreteras, según el servicio que brinda en la red vial, los dos elementos esenciales de la clasificación son la movilidad y el acceso, un ejemplo típico de las vías que cumplen la función de movilidad son: las autopista ya que facilita la movilidad a distancias relativamente grandes y una calle local es el ejemplo típico para las vías que

cumplen la función de acceso, debido a que facilitan el acceso a las viviendas, además de estos tipos de vías, existen otras que desempeñan ambas funciones.



Fuente: Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2004). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales (2ª. Ed.)*, SIECA (p. 3-6). Guatemala.

Figura 1.4. Clasificación funcional de un sistema vial.

La clasificación funcional de las carreteras centroamericanas, admite cinco tipos de carreteras que van desde las rurales a suburbanas, con límites de volumen de tránsito para diseño.

1.6.1.2. Tipo de zona.

Según la AASHTO las zonas urbanas y rurales tienen características, diametralmente, distintas en cuanto a la densidad del tránsito y de la red, además de la cantidad de carriles, motivos de viajes y la interacción entre estos elementos.

Las zonas urbanas son las áreas que están dentro de los límites de una ciudad y las zonas rurales son las áreas fuera de los límites urbanos.

1.6.1.3. Topografía.

El relieve del terreno tiene una influencia muy marcada con la velocidad de operación conforme aumenta la pendiente, disminuye la velocidad, la AASHTO (2004 p 4-63) clasifica a los distintos tipos de relieve según la pendiente como se describe a continuación:

- Terreno llano: Es aquel terreno en donde las condiciones topográficas tienen unas pendientes longitudinales menores o igual a 5%, debido a la poca pendiente facilita la obtención de un alineamiento adecuado que cumpla con las normas centroamericanas de diseño geométrico.
- Terreno Ondulado: Es aquel terreno en donde las condiciones topográficas presentan unas pendientes longitudinales, mayor al 5% y menor o igual a 15%, este tipo de terreno presenta frecuentes subidas y bajadas que hace que ocasionalmente se presenten dificultades para lograr un alineamiento adecuado.
- Terreno montañoso: Este tipo de terreno presenta unas pendientes longitudinales mayores al 15% y menores o igual al 30%, este tipo de terreno presenta dificultades para obtener un alineamiento adecuado, además de altos costos en su construcción.

Como se puede observar, la selección de la velocidad de diseño obvia por completo las expectativas del conductor, varios investigadores han

detectado este error y su búsqueda de la solución dio origen a varios enfoques para evaluar la consistencia del diseño geométrico.

1.7. Enfoques para evaluar la consistencia del trazado.

1.7.1. Enfoque de homogeneidad geométrica.

Este enfoque se basa en la relación de las características de alineación para lograr la consistencia, asumiendo que cuanto menor es la diferencia de características de alineación entre los segmentos sucesivos de la carretera, mejor es la consistencia del alineamiento y mejor es la seguridad en la carreteras.

Generalmente, se utilizan “índices del alineamiento” para evaluar la consistencia en forma directa, Fitzpatrick et al. (2000), definieron los índices de alineamiento como “medidas cuantitativas de carácter general del alineamiento de un segmento de carretera” (p. 20).

Uno de los índice de alineamiento más utilizado es la tasa de cambio de curvatura (TCC), éste indica el ángulo de deflexión total del tramo por unidad de longitud y se presenta en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Cambio de curvatura TCC.

Nombre	Denominación	Unidades	Índices
Tasa de Cambio de Curvatura	TCC	°/km	$\sum \left(\frac{\Delta_i}{L_i} \right)$
Δ_i : Ángulo de deflexión L_i : Longitud del segmento			

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de consistencia utilizado en este índice, se realiza comparando la diferencias entre los segmentos sucesivos de un tramo. Luego, se compara con los umbrales formulados por Lamm et al. (1999).

Tabla 1.4. Umbrales de Lamm et al. (1999).

Calificación	Bueno	Regular	Malo
Umbrales	$\Delta TCC < 180^\circ/km$	$180^\circ/km < \Delta TCC < 360^\circ/km$	$\Delta TCC > 360^\circ/km$

Fuente: Elaboración propia.

Fitzpatrick et al. (2000), realizaron un estudio para determinar cuáles de los índices de alineamiento tenían una relación, estadísticamente, significativa con la frecuencia de accidentes, el estudio demostró que sólo tres índices de alineamiento tenían una relación fuerte y sensible a la frecuencia de accidentes, curiosamente, la tasa de cambio de curvatura no demostró tener una fuerte relación con la frecuencia de accidentes, los índices que si demostraron esta relación fueron:

- Relación de un radio de la curva individual al radio medio para el segmento de carretera en su conjunto;
- Radio medio de curvatura de un segmento de la carretera;
- Tasa promedio de curvatura vertical para un segmento de la carretera.

En la tabla 1.5, se presentan los índices, su denominación y sus dimensionales.

Tabla 1.5. Índices de alineamiento.

Nombre	Denominación	Unidades	Índices
Relación de radio/Radio promedio	R R RP	m/m	$\frac{R_i}{\frac{\sum R_i}{n}}$
Tasa promedio de curvatura vertical	TPCV	km/%	$\frac{\sum \frac{L}{ A }}{n}$
Radio promedio	RP	m	$\frac{\sum R_i}{n}$

L: Longitud del segmento
A: Diferencia algebraica de grados (%)
R_i: Radio de la curva (m)
n: Número de curvas en el segmento *i*

Fuente: Elaboración propia.

1.7.2. Enfoque de Polus.

La base fundamental sobre la que se fundamenta el análisis de consistencia desarrollado por Polus, es la construcción del perfil de velocidad en forma continua, el postuló que si bien las curvas son los elementos más importantes para construir un perfil de velocidad, las tangentes son los elementos geométricos más complejos para predecir la velocidad de operación, debido a que en ellas la velocidad de los vehículos depende de una amplia variedad de características tales como: longitud de la tangente, radio de la curva antes y después de la sección, sección transversal, alineación vertical, terreno en general, distancia de visibilidad disponible, actitud del conductor, aceleración y desaceleración.

Además de las variables antes descritas, para la construcción de un perfil continuo de velocidades es necesario la recolección de una gran cantidad de puntos de medición para poder visualizar las tendencias de los vehículos a lo largo de la tangente y la curva. Polus et al. (2004),

desarrollaron un modelo que considera las características geométricas de un segmento completo de la carretera, el cual se basa en dos parámetros principales y que se presentan a continuación:

1. La zona limitada entre el perfil de la velocidad de operación y la velocidad media;
2. La desviación estándar de la velocidad a lo largo del tramo en estudio.

El modelo desarrollado se presenta en la ecuación siguiente.

$$C = 2.808 \cdot \exp^{-0.278 \cdot Ra \cdot \sigma} \quad (1.1.)$$

En donde:

C = Consistencia básica de un segmento de carretera

Ra = Área normalizada limitada por el perfil de la velocidad media de los vehículos y la velocidad media de funcionamiento (m/s)

σ = Desviación estándar de la velocidad de los vehículos (km/h)

$$R_a = (\sum a_i) / L \quad (1.2.)$$

En donde:

$\sum a_i$ = Suma de i áreas delimitada entre el perfil de velocidad y la velocidad media de funcionamiento (m²/s)

L = Longitud completa de segmento de carretera (m)

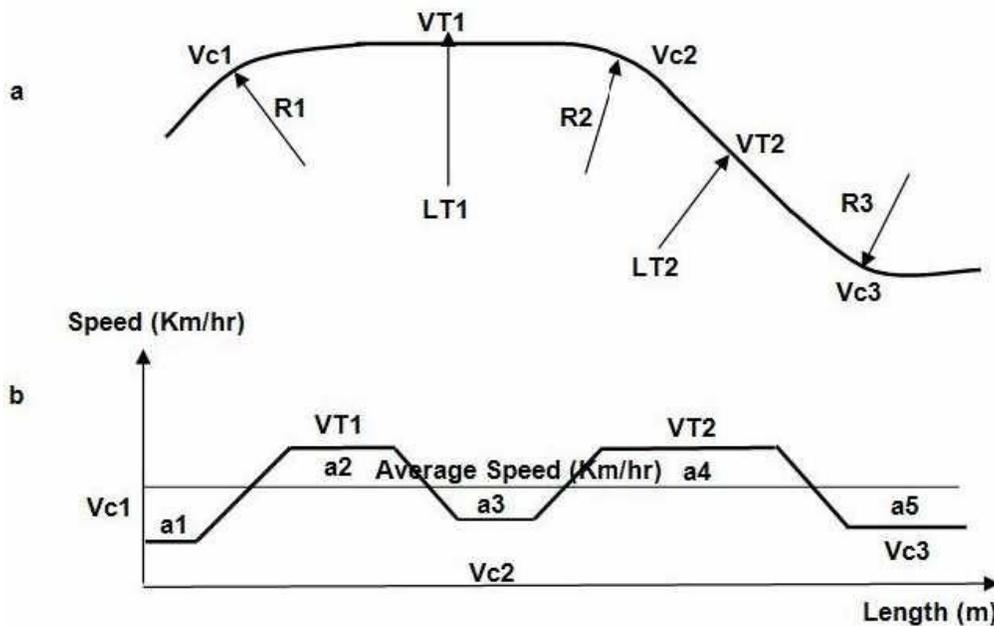
$$\sigma = \left\{ \frac{(V_j - V_{avg})}{n} \right\}^{0.5} \quad (1.3.)$$

En donde:

V_j = Velocidad de operación j^{th} a lo largo del elemento geométrico, tangente o curva (km/h)

V_{avg} = Promedio ponderado (por longitud) velocidad de operación a lo largo del segmento de carretera (km/h)

n = número de elementos geométricos a lo largo del segmento (km/h)



Fuente: Mattar-Habib, C., Polus, A., and Farah, H. (2008). *Further Evaluation of the Relationship between Enhanced Consistency Model and Safety of Two-Lane Rural Roads in Israel and Germany* (p.324). *European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR)*, 8(4), 320-332.

Figura 1.5. (a) ejemplo de un segmento de carretera; (b) ejemplo de un perfil de velocidad.

V_{ci} = velocidad en curva i , (km/h)

VT_i = velocidad en tangente i , (km/h)

a_i = área limitada por la velocidad media y el perfil de velocidad

Posteriormente, en el 2005, Polus et al. mejoraron el Modelo básico desarrollado en el 2004, incluyendo un término exponencial para cuantificar

el impacto de los camiones en la evaluación de los caminos de montaña, y, en el 2008, calibró este modelo con datos recolectados de 26 tramos en Israel y 83 tramos Alemania, concluyendo de que el modelo mejorado garantiza un mayor nivel de seguridad para el análisis de consistencia.

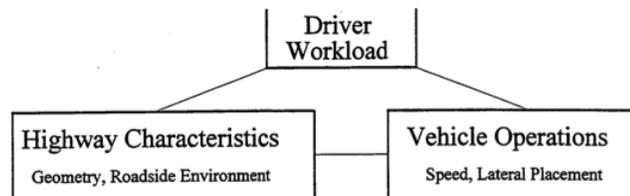
Echaveguren, T. (2012), aplicó el Método de Polus a 5 tramos de carreteras en Chile, él utilizó para la recolección de datos un GPS de 10 Hz el cual capturaba datos a cada 0.1 s, los resultados de su estudio arrojaron que a mayor variabilidad, menor consistencia, independiente del valor de velocidad media en el tramo.

1.7.3. Enfoque basado en la carga de trabajo del conductor.

La carga de trabajo es un concepto muy importante en el diseño geométrico de un camino, ya que es un sistema operado por personas y, para asegurar el buen funcionamiento de este sistema, se requiere que la carga de trabajo impuesta a los conductores no exceda sus capacidades de procesamiento, pero también, no debe ser inferior cuando éste se torne difícil. La carga de trabajo está determinada por los mecanismos físicos y mentales que debe poner en juego el conductor al momento de conducir su vehículo.

Krammes et al. (1995) definieron la carga de trabajo como: “La parte del tiempo que el conductor necesita mirar a la carretera mientras conduce” (p. 67) para realizar esta actividad involucra aspectos fisiológicos y anímicos del conductor, este concepto es demasiado amplio que tiene su propia metodología para analizar la consistencia del alineamiento de un camino, en la presente investigación no se profundiza en el tema debido a que la metodología que se emplea es la velocidad de los vehículos.

La figura 1.6 explica la relación en forma general de la interacción de la carretera y conductor del vehículo, poniendo en contexto las causas y consecuencias de las inconsistencias de un alineamiento.



Fuente: Heger, R. (1998). *Driving behavior and driver mental workload as criteria of highway geometric design quality* (p.43-3). Transportation Research Board, Issue Number: E-C003, international Symposium on Highway Geometric Design Practices, Boston, Massachusetts.

Figura 1.6. Relación entre la carga de trabajo del conductor, las características de la carretera y las operaciones de vehículos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.7. Ruta Centroamericana 14, Baja Verapaz, Guatemala.



Fuente: Google maps.

Figura 1.8. Ruta Centroamericana 1, Patzicia, Guatemala.

En la figura 1.7 se puede observar el típico alineamiento de un camino de montaña con muchas curvas enlazadas por tangentes cortas para sortear las dificultades que impone el terreno, este tipo de caminos induce al conductor una carga de trabajo alta.

La carga de trabajo que se impone al conductor en el camino mostrado en la figura 1.8 es inverso al efecto que transmite en el camino de la figura 1.7, esto se debe a que los caminos construidos en terrenos llanos no imponen grandes dificultades al momento de diseñar, por lo que, generalmente, se utilizan para su diseño velocidades más altas, erróneamente muchas veces se construyen rectas de gran longitud, las cuales imponen una carga de trabajo baja a los conductores dando como resultado un aumento de accidentes, los caminos al igual que los sistemas deben ser diseñados usando, eficientemente, la capacidad de carga de trabajo del operador.

Musa, T., (2003), en su investigación desarrolló un modelo de carga de trabajo del conductor que combina la complejidad de la carretera y la velocidad de operación con un enfoque de limitación de tiempo de carga de trabajo.

La carga de trabajo del conductor, según Musa, T. (2003) se ve afectado por:

- Los aspectos psico/fisiológicas del conductor, es decir, fatiga, motivación, edad, sexo, drogas, etc;
- La complejidad de la carretera, ésta se representa por el efecto del diseño en el comportamiento del conductor y el tránsito;
- El uso de sistemas de información a bordo;
- La velocidad de funcionamiento que se determina por la percepción del conductor de la carretera, de acuerdo con sus expectativas;
- Adaptación del controlador, la cual está determinada por el comportamiento del conductor bajo diferentes escenarios de conducción.

Con el modelo que desarrollo, logro demostrar la importancia de la velocidad en la evaluación de la carga de trabajo de los conductores.

1.7.4. Enfoque de Lamm.

El enfoque de Lamm et al. se enfoca en el análisis de curvas aisladas, 1986 postulo que existía una correlación entra la tasa de cambio de curvatura y la ocurrencia de accidentes, desarrollo indicadores y umbrales para calificarlos, lo que se amplía a continuación.

1.8. Indicadores basados en velocidad, propuestos por Lamm et al. (1999).

Los indicadores de consistencia pueden agruparse, según sus variables, las cuales varían, según la línea de investigación, entre ellos tenemos a los indicadores de fricción, visibilidad, etc., pero los que se empleara en la presente investigación, son los indicadores de velocidad propuestos por Lamm et al. (1999).

Los indicadores que propusieron Lamm et al. (1999), se basan en la velocidad, para el caso específico de caminos existentes, se mide la velocidad por medio de sensores y se determina el percentil 85. En el caso de caminos en proceso de diseño se estima, según la geometría del camino, por medio de modelos que ellos desarrollaron.

Ellos desarrollaron, tres indicadores basados en la velocidad, a continuación se presentan los dos criterios que se utilizarán en la presente tesis.

- el criterio I: Consistencia en elementos simples, se basa en la diferencia de la velocidad de operación medida y la velocidad de diseño para curvas aisladas;
- el criterio II: Consistencia entre elementos sucesivos, se determinaba por la diferencia de velocidades del percentil 85 entre elementos continuos.

1.9. Criterios para la evaluación de consistencia propuestos por Lamm et al. (1999).

Lamm propuso tres umbrales para cada uno de sus tres criterios para calificar la seguridad del diseño geométrico de un camino, correlaciono el número de accidentes con la geometría de los caminos.

Calificación bueno: significa que no necesita cambios y que está acorde con las expectativas del conductor, en nuestro caso para hacerla más visual se le asignó el color verde para identificarlo.

Calificación tolerable: significa que el sitio necesita cambios o está, relativamente, bien, depende a que margen se acerque, si se acerca a la calificación bueno se acepta, a diferencia, si se acerca a la calificación pobre éste necesita cambios, este umbral depende del grado de inconsistencia que el diseñador está dispuesto a aceptar, para identificarlo en la presente tesis se le asignó el color anaranjado.

Calificación pobre: significa que dicho sitio atenta contra los conductores y es necesario rediseñarlo, se le asignó el color rojo para identificarlo.

A pesar de que estos umbrales fueron propuestos hace varios años es, aun son ampliamente utilizados por investigadores de todo el mundo y, en la presente investigación se emplearán estos umbrales para calificar la inconsistencia de los caminos de montaña en Guatemala.

Tabla 1.6. Indicadores y umbrales de Lamm et al.

Diseño	Color	SC I (EC. 1.4)	SC II (EC. 1.5)
		[km/h]	[km/h]
Bueno		$ V_{85n} - V_d < 10$	$ V_{85n} - V_{85n+1} < 10$
Tolerable		$10 < V_{85n} - V_d < 20$	$10 < V_{85n} - V_{85n+1} < 20$
Pobre		$ V_{85n} - V_d > 20$	$ V_{85n} - V_{85n+1} > 20$

Fuente: Elaboración propia.

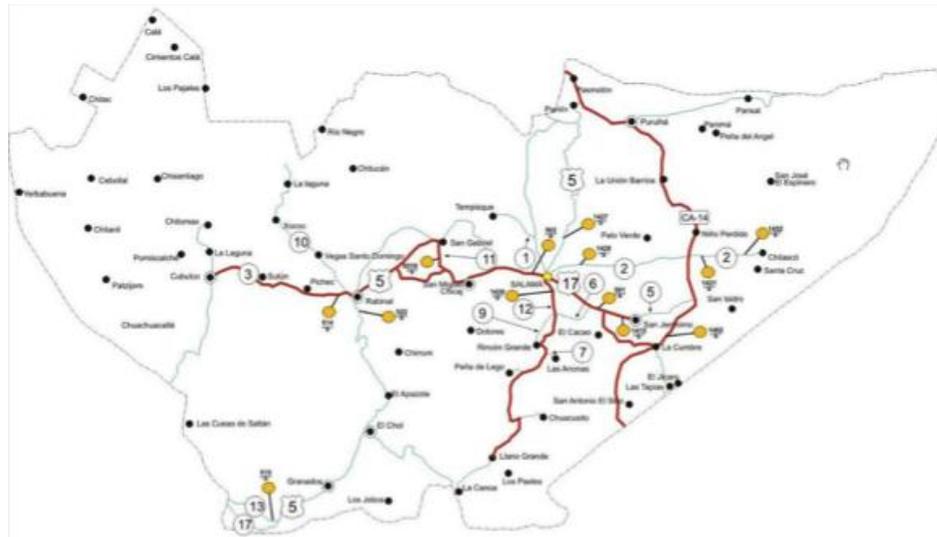
2. DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PREDICCIÓN DE VELOCIDADES, EN CURVAS HORIZONTALES.

2.1. Relación: Velocidad - Geometría.

La relación entre la velocidad y la geometría ha sido demostrada por varios investigadores como Lamm et al. en el año 1999 y Fitzpatrick et al. en el año 2000 por mencionar algunos, el procedimiento que se siguió para el desarrollo del modelo fue la toma de datos del terreno, procesamiento estadístico y análisis de resultados, etapas que se amplían a continuación.

2.2. Área de muestreo.

Para seleccionar el sitio de muestreo, se analizó el país en busca de un departamento que posea la orografía y las rutas adecuadas para la recolección de datos de campo, el departamento que posee las condiciones topográficas, viales y de ubicación, fue Baja Verapaz, se amplían a continuación las tres condiciones por las que fue seleccionado.



Fuente: Dirección General de Caminos (2014), *Mapas de red vial por departamento*. Disponible: http://www.caminos.gob.gt/public_html/mapa/redvial/Bajaverapaz.swf.

Figura 2.1. Mapa del departamento de Baja Verapaz.

2.2.1. Ubicación.

El departamento de Baja Verapaz está ubicado en el centro de la República de Guatemala, su cabecera departamental es la Ciudad de Salamá, la cual está ubicada, aproximadamente, a unos 150 km de la Ciudad de Guatemala, la extensión territorial del departamento de Baja Verapaz es de 3,124 km².

2.2.2. Orografía.

Las características topográficas del departamento son, predominantemente, montañosas, como puede verse en la tabla 2.1 sólo en la sierra de Chuacús se encuentra el 50.73 % del departamento, lo que hace que sea ideal para el estudio de caminos de montaña que se desarrolla en el presente trabajo de graduación.

Tabla 2.1. Fisiografía a nivel de gran paisaje, Baja Verapaz.

No.	Nombre del gran paisaje	Área (km2)	Porcentaje
1	Serranías y valles profundos del norte de la sierra de Chuacús	634.25	20.65
2	Superficies planas interiores de Chuacús	187.27	6.19
3	Sierra de Chuacús	1533.67	50.73
4	Sierra de las Minas	244.55	8.09
5	Laderas degradadas de serpentinita	132.14	4.37
6	Terrazas antiguas del río Motagua	2.48	0.08
7	Terrazas recientes del río Motagua	0.04	0.00
8	Laderas degradadas de la cordillera de los Cuchumatanes	0.07	0.00
9	Montañas de Tactic Tucurú Senahú	178.77	5.91
10	Laderas degradadas sedimentarias	117.28	3.88
11	Abanico coluvio-aluvial del Polochic	2.70	0.09
	Suma	3023.22	99.99

Fuente: Secretaría de Planificación Programación de la Presidencia (2010), *Plan de Desarrollo Departamental de Baja Verapaz 2011-2015 (p.23)*, Guatemala.

2.2.3. Carreteras bidireccionales.

En cuanto a la comunicación por vía terrestre el departamento posee 121.34 km de caminos asfaltados, no asfaltadas 271.36 km y 830.38 km de vereda, todos bidireccionales, el detalle por municipios se presenta en la tabla 2.2 para la presente investigación sólo se analizarán los caminos asfaltados.

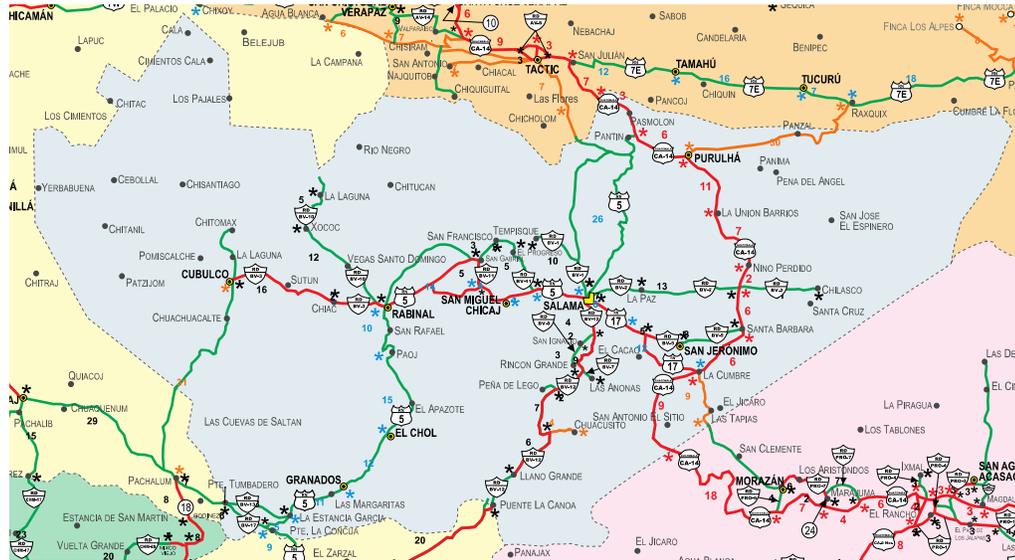
Tabla 2.2. Caminos por tipo de rodadura de Baja Verapaz.

Municipio	Asfalto	No asfaltado	Vereda
Salamá	34	95.88	109.82
San Miguel Chicaj	16.31	31.02	112.81
Rabinal	12.5	40.4	96.58
Cubulco	7.5	17.77	232.9
Granados	9.77	8.43	21.04
El Chol	0	20.17	39.95
San Jerónimo	30.31	27.31	73.44
Purulhá	10.85	30.38	143.84
Suma	121.34	271.36	830.38

Fuente: Secretaría de Planificación Programación de la Presidencia (2010), *Plan de Desarrollo Departamental de Baja Verapaz 2011-2015* (p. 43), Guatemala.

2.3. Análisis de las carreteras del área.

En la figura 2.2 se puede observar la distribución de la red vial del departamento de Baja Verapaz, la nomenclatura utilizada por tipo de rodadura y clasificación, según la funcionalidad de la ruta se presenta en el cuadro 2.3.



Fuente: Sistema de Información Nacional (2006), *Red vial de Guatemala*. Disponible: www.siinsan.gob.gt/portals/0/pdf/RedVial.pdf.

Figura 2.2. Mapa de la red vial del departamento de Baja Verapaz.

Tabla 2.3. Nomenclatura para las rutas de la DGC.

Nomenclatura, según funcionalidad		Nomenclatura, según carpeta de rodadura	
Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
CA	Rutas Centroamericanas		Carretera pavimentada
RN	Rutas Nacionales		Carretera no pavimentada
RD	Rutas Departamentales		
CR	Caminos Rurales		
CM	Caminos Municipales		

Fuente: Sistema de Información Nacional (2006), *Red vial de Guatemala*. Disponible: www.siinsan.gob.gt/portals/0/pdf/RedVial.pdf.

Según el mapa de la red vial del Depto. de Baja Verapaz se puede observar que existen rutas, con distintas funcionalidades y tipo de rodadura las cuales se presentan en la tabla 2.4, para la presente investigación se tomarán en cuenta, únicamente, las rutas centroamericanas y nacionales, que estén asfaltadas, esto obedece a que son las únicas que están regidas por la normativa centroamericana.

Tabla 2.4. Clasificación de carreteras según funcionalidad, Baja Verapaz.

No.	Tramo	Clasificación	Simbología	
1	El Sitio - Pasmolón	Ruta Centroamericana 14	CA-14	
2	Puente la Concuca - Pantin	Ruta nacional 5	RN-5	
3	La Cumbre - Salamá	Ruta nacional 17	RN-17	
4	Salamá – El Progreso	Ruta Departamental 1	RD-BV-1	
5	Salamá - Chilascó	Ruta Departamental 2	RD-BV-2	
6	Rabinal - Cubulco	Ruta departamental 3	RD-BV-3	
7	La Joya - Santa Bárbara	Ruta Departamental 5	RD-BV-5	
8	RD-BV-12 - Las Anonas	Ruta Departamental 7	RD-BV-7	
9	RD-BV-12 - Rincón Grande	Ruta Departamental 9	RD-BV-9	
10	Rabinal – La Laguna	Ruta departamental 10	RD-BV-10	
11	RN-5 – San Gabriel	Ruta Departamental 11	RD-BV-11	
12	Salamá – Puente la Canoa	Ruta Departamental 12	RD BV-12	
13	Puente Tumbadero – La Estancia García	Ruta departamental 13	RD BV-13	
14	Puente Tumbadero – Puente la Concuca	Ruta Departamental 17	RD BV-17	

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla 2.4 la Ruta Nacional 5, no se encuentra asfaltada en su totalidad y al realizar el recorrido de reconocimiento se constató que esta ruta no cumple con las normativas de diseño geométrico, nacionales ni centroamericanas, por tal razón se rechaza para la presente investigación.

Las rutas seleccionadas para la recolección de datos fueron la Ruta Centroamericana 14 y la Ruta Nacional 17, dado que están asfaltadas en su totalidad y cumplen con las normas de diseño geométrico nacional.

2.4. Toma de datos.

Para la presente investigación se necesitan dos bases de datos fundamentales para el desarrollo de los modelos:

1. Datos de las características geométricas del trazado y;
2. Datos de velocidades de operación.

2.4.1. Factores no relacionados con la geometría.

Con el objetivo de aislar los resultados de factores no relacionados con la geometría de carreteras, los sitios debieron reunir los siguientes criterios:

- Sin cruces, ni puentes;
- Buenas condiciones del pavimento;
- Sin dispositivos reductores de velocidad.

Cada uno de estos factores influyen en la velocidad de operación, de los conductores, para la identificación de estos sitios se realizó un recorrido por las dos rutas seleccionadas y se determinó que 50 curvas estaban influenciadas por factores no relacionados con la geometría, se tomaron las coordenadas geodésicas para ubicarlas en el mapa de la red vial y se procedió a eliminarlas de la población de sitios a medir.

2.4.2. Parámetros fijos que se deben medir del trazado.

Las variables geométricas independientes que se midieron para el desarrollo del modelo para la predicción de velocidades en curvas horizontales se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Variables consideradas para modelos de predicción de velocidades.

Combinación geométrica	Variables consideradas
Curva horizontal	$R, R_{N-1}, G, Lc, Ls, e, Condición$
Tangentes	$L_T,$
Sección típica	W_L, e
R = radio de la curva en estudio (m)	$\Delta = \text{ángulo total girado } (^{\circ})$
R_{n-1} = radio de la curva previa (m)	$G = \text{grado de curvatura } (^{\circ})$
L_c = longitud de la curva (m)	$W_L = \text{ancho de vía } (^{\circ})$
L_s = Longitud de la clotoide (m)	
e = peralte (%)	

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Datos de las características geométricas del trazado.

La importancia de la base de datos geométricos del trazado se debe a que existe una mutua relación entre el trazado y la velocidad de operación, si bien se sabe que esta relación existe, éste varia, según las condiciones de cada región, por lo tanto, fue necesario la restitución del trazado de las rutas estudiadas.

Para la restitución de la geometría en planta, se descargaron imágenes satelitales del programa Google Earth Pro, con una resolución de 4800 x 2971 pixeles, posteriormente, las imágenes se importaron al programa Civil3D, al tener la imagen a la escala adecuada se procedió a restituir el alineamiento de las rutas según intervalos de radios propuestos por la Dirección General de Caminos de Guatemala.

Por medio de la restitución del trazado se determinó que el universo de curvas horizontales en el departamento de Baja Verapaz es de 206.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.3. Restitución en planta, cumbre de Santa Elena, Baja Verapaz.

2.4.4. Tamaño mínimo de la muestra de curvas horizontales.

Después de determinar el número total de curvas horizontales en los dos tramos estudiados se procedió a eliminar las 50 curvas influenciadas por factores no relacionados con la geometría, llegando a determinar que la población es de 156 curvas.

Para determinar la muestra necesaria para el desarrollo del modelo, se utilizó la fórmula 2.1 dado que se conoce la población.

Tamaño de la muestra a través de una población determinada.

$$n = (Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N) / (N \cdot E^2 + Z^2 \cdot p \cdot q) \quad (2.1.)$$

En dónde:

n = tamaño de la muestra

Z = nivel de confianza (1.96 nivel de confianza de 95%)

p = variabilidad positiva (0.82 corresponde al 82%)

q = variabilidad negativa (0.18 corresponde al 18%)

N = tamaño de la población (206 - 50 = 156 total de curvas aptas para medir)

E = precisión o error (0.15 corresponde al 15%)

$$n = (1.96^2 \cdot 0.82 \cdot 0.18 \cdot 156) / (156 \cdot 0.10^2 + 1.96^2 \cdot 0.82 \cdot 0.18)$$

$$n = 42 \text{ curvas}$$

Por lo tanto, la muestra para realizar un estudio con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 10% en una población de 156 curvas con una velocidad de diseño de 40 a 80 km/h, debe componerse de 42 curvas, como mínimo, el tamaño de la muestra es de 83 curvas horizontales clasificadas por radio y velocidad de diseño, la cuales se plasman en la tabla 2.6., cabe destacar que las velocidades de operación en cada curva horizontal se midió en ambas direcciones lo que da un total de 166 mediciones.

Tabla 2.6. Clasificación de las curvas horizontales por radios según intervalos propuesto por la DGC.

Velocidad		30	40	50	60	70	80	TOTAL
G	RADIO	No.	No.	No.	No.	No.	No.	
1	1145.92	0	0	0	0	0	0	0
2	572.96	0	0	0	0	6	0	6
3	381.97	0	0	0	0	6	2	8
4	286.48	0	0	0	2	16	2	20
5	229.18	0	0	0	4	12	2	18
6	190.99	0	0	2	0	6		8
7	163.7	0	0	0	2	10		12
8	143.24	0	0	0	4			4
9	127.32	0	0	0	8			8
10	114.59	0	2	2	32			36
11	104.17	0	2	0				2
12	95.49	0	2	0				2
13	88.15	0	0	2				2
14	81.85	0	0	0				0
15	76.39	0	6	18				24
16	71.62	0	0					0
17	67.41	0	4					4
18	63.66	0	2					2
19	60.31	0	2					2
20	57.3	0	4					4
21	54.57	0	0					0
22	52.09	0	4					4
23	49.82	0						0
24	47.75	0						0
25	45.84	0						0
26	44.07	0						0
27	42.44	0						0
28	40.93	0						0
Total		0	28	24	52	56	6	166

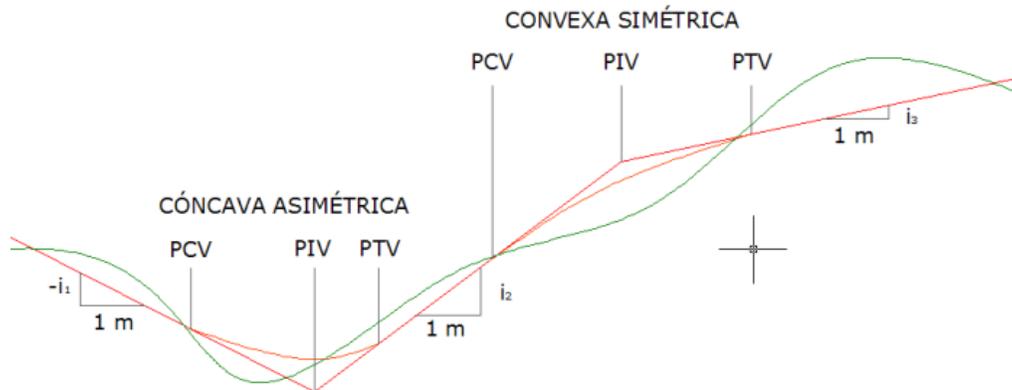
Fuente: Elaboración propia.

Luego de clasificar las curvas horizontales por radios, fue necesario clasificarlas, según su altimetría, para poder realizar esta clasificación se realizó un levantamiento topográfico con una estación total Trimble, posteriormente, los puntos obtenidos se importaron al programa CIVIL3D, por medio del cual se obtuvieron los perfiles de las curvas, al tener el perfil de las curvas horizontales seleccionadas se procedió a clasificarlas, según los intervalos desarrollados por Fitzpatrick et al. (2000), los resultados se muestran en la tabla 2.7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.4. Restitución en elevación, utilizando estación total.



Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS, Ministerio de Transporte (1998). *Manual de Diseño Geométrico para Carreteras*. Bogotá.

Figura 2.5. Perfil típico de una curva horizontal.

Tabla 2.7. Clasificación de las curvas horizontales por elevación según intervalos propuestos por Fitzpatrick et al. (2000).

No	Condición	Velocidad						Total
		30	40	50	60	70	80	
1	Curva horizontal en pendiente (-9% - 4%)	0	11	5	3	4	0	23
2	Curva horizontal en pendiente (-4% - 0%)	0	2	1	11	14	1	29
3	Curva horizontal en rampa (0% - 4%)	0	2	1	11	14	1	29
4	Curva horizontal en rampa (4% -9%)	0	11	5	3	4	0	23
5	Curva horizontal con acuerdo convexo	0	0	8	16	6	2	32
6	Curva horizontal con acuerdo cóncavo	0	2	4	8	14	2	30
Total		0	28	24	52	56	6	166
Se midieron ambos sentidos de circulación de los 83 sitios dan 166 mediciones								

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de que todas las combinaciones geométricas estén representadas es para que el modelo represente adecuadamente la velocidad de las distintas combinaciones geométricas existentes en el área seleccionada.

2.4.5. Parámetros fijos que se deben medir de la velocidad.

2.4.5.1. Velocidad de diseño.

En el trazo de un alineamiento nuevo, la velocidad de diseño define las características geométricas del alineamiento, en la restitución del trazado el proceso es inverso al diseño, es decir que en base al radio de las curvas horizontales y las longitud de las clotoides de transición se determinó la velocidad de diseño.

2.4.5.2. Velocidad del percentil 85.

Es la velocidad a la cual conduce el 85% de los conductores del área estudiada y se determinó por medio de mediciones puntuales en el centro de la curvas.

2.4.5.3. Velocidad deseada.

Esta velocidad se presenta en la tangentes largas y en las curvas de gran desarrollo en donde no existen restricciones de visibilidad, en el departamento de Baja Verapaz estos sitios son casi inexistentes, por lo que se utilizó la figura 2.10 para determinar esta velocidad, llegando a concluir que esta velocidad es de 100 km/h.

2.4.6. Datos de velocidades de operación.

En cuanto a la base de datos de velocidades de operación, ésta es inexistente en el país, por lo que fue necesario realizar mediciones para formar una base de datos de velocidades a flujo libre de vehículos livianos.

2.4.7. Tamaño de la muestra de velocidades de operación.

Antes de iniciar las mediciones de velocidades puntuales en las curvas horizontales fue necesario definir una muestra que satisfaga requerimientos estadísticos mínimos, por lo que se utilizó la expresión de 2.2, la cual se recomienda utilizar en el ámbito del transporte cuando no se conoce el tamaño de la población.

$$N = (S^2 \cdot K^2 \cdot (2 + U)^2) / (2 \cdot E)^2 \quad (2.2.)$$

En dónde:

S = desviación estándar

K = constante para nivel de confiabilidad

U = depende del percentil buscado

E = error permitido

Los valores asumidos para la presente investigación son:

$S = 8.0$ este valor corresponde a un valor medio observado en estudios de velocidad

$k = 1.6$ este valor corresponde a una probabilidad de 98.8% de que la velocidad estimada sea real

$U = 1.04$ este valor corresponde para 15 u 85 percentil

$E = 2.5 \text{ km/h}$ este valor corresponde a la precisión requerida para el valor medio de la velocidad

$$N = (8^2 \cdot 1.6^2 \cdot (2 + 1.04)^2) / (2 \cdot 2.5)^2$$

$$N = 61$$

El resultado obtenido para el tamaño de la muestra es de 61 observaciones, se acepta ya que supera a la muestra mínima recomendada para estudios de velocidad (30 observaciones).

Una de las ventajas de trabajar con datos tomados, recientemente, es que refleja la velocidad del parque automotor que circula por el área, actualmente, inclusive los entes rectores de transportes en otros países recomiendan que después de algunos años es necesario volver a calcular la velocidad de operación del parque automotor para determinar si el percentil 85 ha cambiado, paralelamente, con el aumento de las prestaciones de los vehículos.

Para realizar las mediciones puntuales de velocidades los observadores se ubicaron en el centro de las curvas horizontales, lugar en donde existe un aumento de la velocidad de operación, según estudios realizados por Fitzpatrick et al. (2000).

Las pautas necesarias que se tienen presentes al momento de efectuar las observaciones del presente estudio son:

- solo se medirán automóviles ligeros;
- los vehículos circulen a flujo libre;
- condiciones de iluminación adecuada;
- condiciones climáticas favorables.

El equipo con el que se contó para realizar las mediciones instantáneas fueron pistolas, radar y un formulario que se presenta en el anexo 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.6. Medición de velocidades del tramo Niño Perdido - La Unión Barrios.

2.5. Procesamiento estadístico.

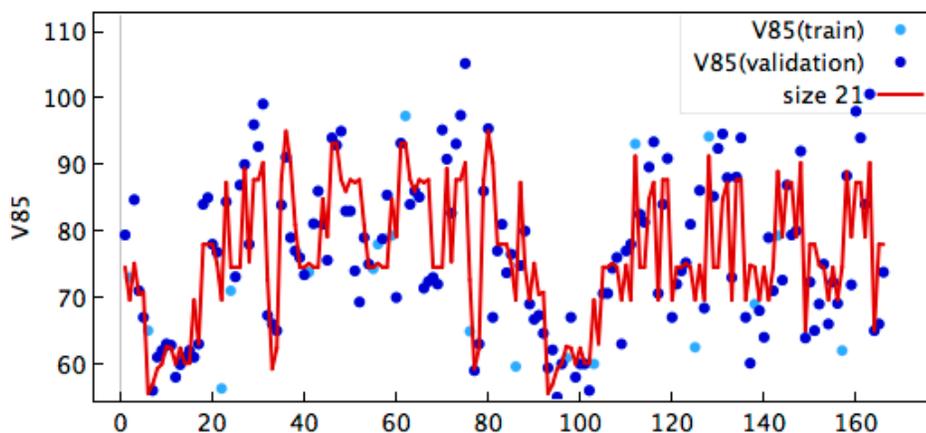
Concluidas las mediciones o comprobaciones de los parámetros fijos y las mediciones de velocidad, se prueba la normalidad, homogeneidad y la independencia de los grupos de datos.

Se procede a determinar la velocidad de operación, para ello se dispone de muchas variables por sitios (radio, peralte, longitud de la curva de transición, grado de curva y velocidad), que se emplean en el desarrollo de los modelos.

El modelo de predicción del perfil de velocidad de operación para carreteras rurales de dos carriles se obtienen con la aplicación de técnicas

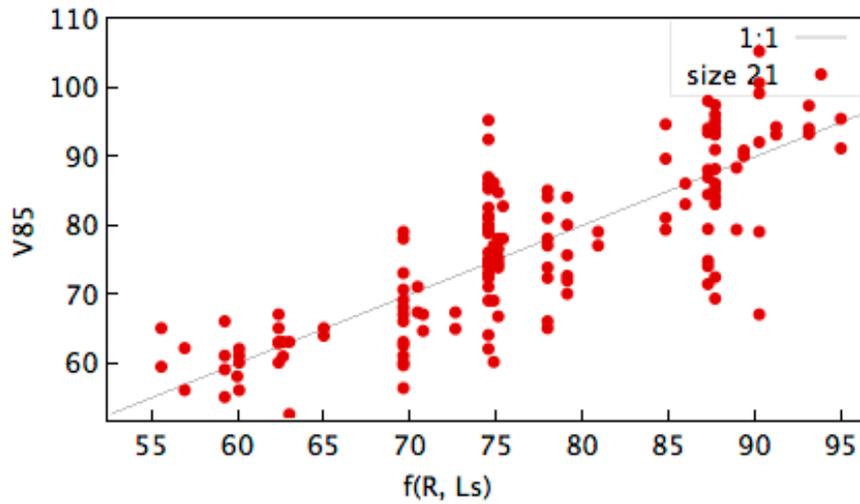
de regresión. El procesamiento estadístico de las variables analizadas se realiza con el programa Eureka 0.99.5.

En el desarrollo de los modelos se trabajan regresiones con los datos clasificados por intervalos de radios y por condición, los modelos de mejor ajuste son los que relacionan la velocidad, el radio y longitud de la clotoide de transición, para las curvas horizontales (condiciones 1 al 6). Se introduce como variable independiente el radio y la longitud de la clotoide, en el caso específico de las curvas horizontales.



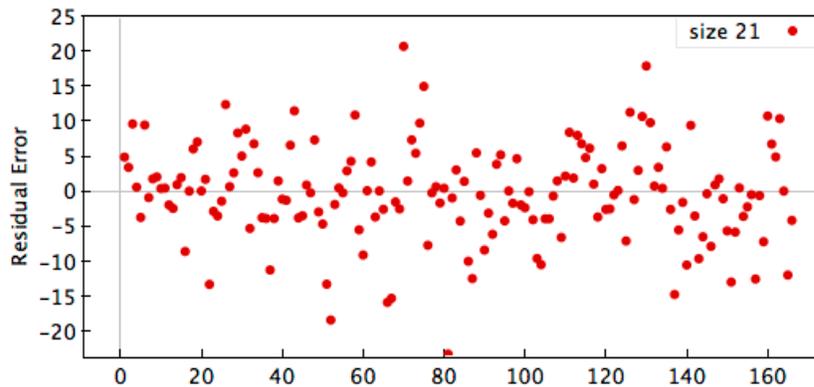
Fuente: Eureka 0.99.5.

Figura 2.7. Ajuste de la solución.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.8. Velocidad observada vs. velocidad pronosticada (-9% - 9%).



Fuente: Eureka 0.99.5.

Figura 2.9. Error residual.

En la tabla 2.8 se presenta el modelo que, finalmente, se adoptó para la elaboración del perfil de velocidades de operación en Baja Verapaz. Las seis combinaciones de curva horizontal, se resumieron en una sola, debido a que la orografía obliga al cambio constante de la velocidad de diseño, es decir, el trazo en planta está condicionado por la rasante.

Para las tangentes se propone utilizar el modelo de Lamm et al. (1999), en la cual la tangente está condicionada por las curvas que la preceden y la suceden, este modelo se validará en forma conjunta con el modelo desarrollado en la presente investigación en el capítulo 3, dedicado, específicamente, a este tema.

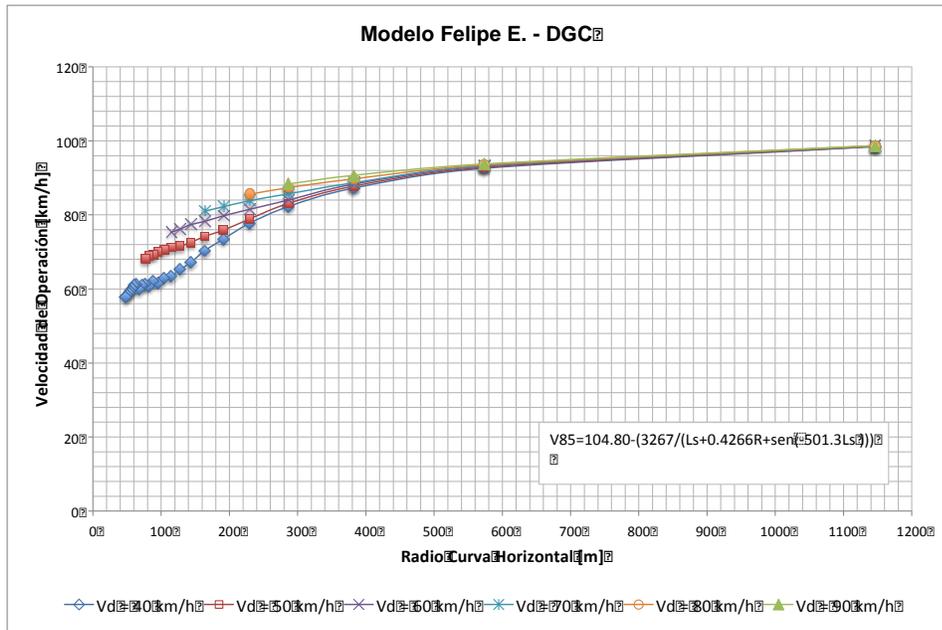
Tabla 2.8. Modelos de predicción de velocidades de operación en curvas horizontales.

No.	CONDICIÓN	EXPRESIÓN	r ²	MSE	SITIOS
1	Curva horizontal en pendiente (-9% a -4%)	EC. (2.3) $V_{85} = 104.8 - \frac{3267}{L_s + 0.4266R + \sin(-501.3L_s)}$ Dónde: R = Radio de curva Ls = Longitud de curva de transición	0.63	49.66	23
2	Curva horizontal en pendiente (-4% a 0%)				29
3	Curva horizontal en rampa (0% a 4%)				29
4	Curva horizontal en rampa (4% a 9%)				23
5	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo				32
6	Curva horizontal combinada acuerdo cóncavo				30
numero de curvas 83, numero de mediciones 166.					

Fuente: Elaboración propia.

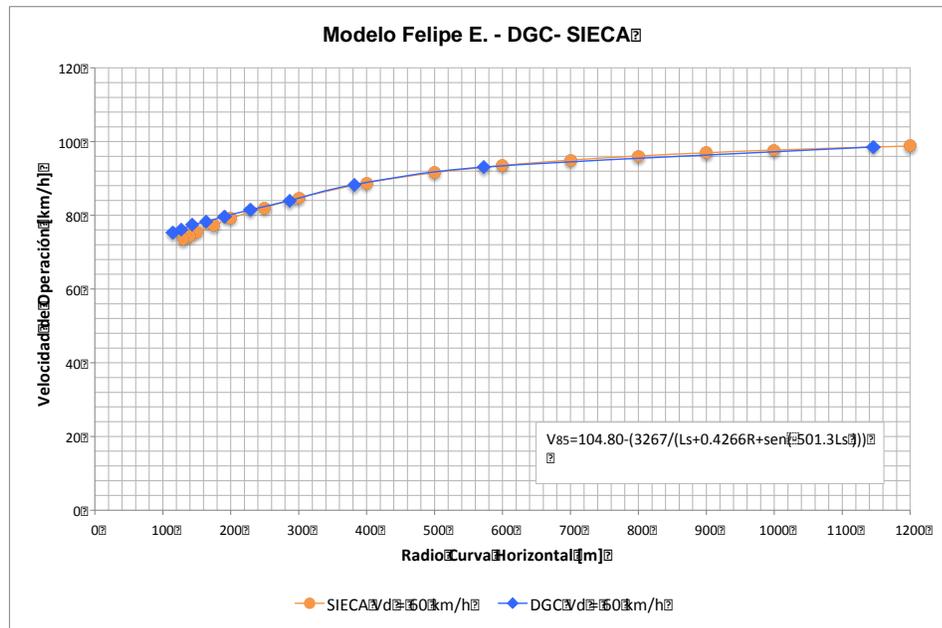
2.6. Análisis de resultados.

En la figura 2.10 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el modelo desarrollado para curvas horizontales, según la normativa de la Dirección General de Caminos (DGC), donde se puede apreciar que al inicio la velocidad no aumenta, se mantiene con un ascenso leve, después de superar el radio de 100 m la velocidad aumenta y, posteriormente, la velocidad tiende a ser constante, es decir que, se alcanza la velocidad deseada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.10. Relaciones velocidad–geometría especificación de la DGC.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.11. Comparativa velocidad – geometría, especificación de la DGC y especificaciones de la SIECA.

El objetivo que se busca al comparar el comportamiento del modelo para la predicción de velocidades, utilizando las especificaciones de diseño geométrico de la DGC y la SIECA se debe a que la mayoría de caminos medidos fueron construidos hace varios años antes de que entrara en vigencia la normativa centroamericana en su versión No. 2, pero como puede observarse en la figura 2.11 las variación de la velocidad de operación entre ambas especificaciones es mínima, lo que demuestra que el modelo puede utilizarse para el análisis de consistencia para caminos construidos con la normativa vigentes (SIECA 2004).

3. VALIDACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO.

Para validar el modelo para la predicción de velocidades de operación, desarrollado en Baja Verapaz, se selecciono un tramo vial del departamento de Sacatepéquez, con el propósito de demostrar que es transferible y así poder aplicarlo a nivel nacional para el análisis de consistencia en caminos de montaña.

3.1. Información del departamento.

El departamento que se seleccionó para validar el modelo para la predicción de velocidades de operación, fue Sacatepéquez, debido, principalmente, a su orografía, este departamento está situado sobre las altas mesetas de la cordillera de la Sierra Madre, su altitud oscila entre 700 y 3980 msnm, además, posee zonas montañosas, enormes picos volcánicos, Altas mesetas, Altas llanuras y profundas quebradas, todo esto hace que este Departamento sea idóneo para validar el modelo desarrollado.

Topografía: 2.5 km Terreno llano y 2.5 km terreno montañoso;
Tramo: Alotenango – Las Lajas;
Longitud del tramo: 5,000 m;
Estacionamientos: inicio 85+000.00 - final 90+000.00;
Coordenadas: inicio 14°28'58.90"N, 90°48'28.12"W – final
14°26'24.38"N, 90°48'46.03"W.



Fuente: Google Earth Pro.

Figura 3.2. Imagen satelital tramo Alotenango – Las Lajas.

3.3. Ecuaciones validadas.

Los modelos validados se presentan en la tabla 3.1, para curvas horizontales se validó el modelo desarrollado por el autor del presente trabajo de graduación, y, para tangentes se validó el modelo de Lamm et al. (1999).

Tabla 3.1. Modelos de velocidad propuestos para caminos de montaña en Guatemala.

AUTOR	ALINEAMIENTO	EXPRESIÓN	EC.	PAÍS
Felipe E.	Curva horizontal	$V_{85} = 104.8 - \frac{3267}{L_s + 0.4266R + \sin(-501.3L_s)}$	2.3	GUA.
Lamm et al.	Tangente caso 1: $L_T \leq L_{Tmin}$	$V_{85,T} = \frac{(V_{85,n-1} + V_{85,n+1})}{2}$	3.1	GER
	Tangente caso 2: $L_T \geq L_{Tmax}$	$V_{85,T} = V_{des}$	3.2	
	Tangente caso 3: $L_{Tmin} < L_T < L_{Tmax}$	$V_{85,T} = \sqrt{12.04a(TL - TL_{min}) + V_{85,n-1}^2}$	3.3	
<p>Dónde:</p> <p>EC. 3.4</p> $L_{Tmin} = \frac{ V_{85,n-1}^2 - V_{85,n+1}^2 }{25.92a}$ <p>EC. 3.5</p> $L_{Tmax} = \frac{ 2 \cdot V_{des}^2 - V_{85,n-1}^2 - V_{85,n+1}^2 }{25.92 \cdot a}$ <p>R = Radio de curva Ls = Longitud de curva de transición a = d = 0.85 m/s² LT = Longitud de la tangente LTmin = Longitud de tangente mínima para acelerar o desacelerar de V_{85,n-1} a V_{85,n+1}. LTmax = Longitud de tangente máxima</p>				

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Variables independientes de velocidad.

Las variables independientes de velocidad que son importantes para determinar la velocidad de operación en las tangentes, se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Variables independientes de velocidad en km/h.

Simbología	Media	Dimensional	
V _{max}	Velocidad deseada	km/h	GUA.
A	Aceleración	m/s ²	GER.
L _{Tmin}	Longitud de la tangente mínima	m	GER.
L _{Tmax}	Longitud de la tangente máxima	m	GER.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Variables independientes geométricas.

Las variables independientes geométricas básicas para determinar la velocidad de operación en las curvas horizontales, se resumen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Variables independientes geométricas en m.

Modelo	Simbología	Media	Dimensional
Felipe E.	R	Radio	m
	L _c	Longitud de curva horizontal	m
	L _s	Longitud de clotoide	m
Lamm et al.	L _T	Longitud de tangente	m

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Velocidad de operación estimada con modelos.

Se calculó la velocidad de operación en cada sitio a lo largo del tramo, para las curvas horizontales se utilizó el modelo desarrollado por el autor de la presente trabajo de graduación y para las tangentes se utilizó el modelo propuesto por Lamm et al. (1999), los resultados se presentan en la tabla 3.4, columna 5 y 9.

3.4.1. Velocidad de operación en curvas horizontales.

Ejemplos del cálculo de la velocidad de operación en curvas horizontales, en la Ruta Nacional 14, utilizando el modelo desarrollado por Felipe E. (2014).

$$V_{85} = 104.8 - 3267/(L_s + 0.4266R + \sin(-501.3L_s)) \quad (2.3.)$$

Sitio 1

$$R_1 = 381.97 \text{ m}$$

$$L_{S1} = 23.00 \text{ m}$$

$$V_{85,1} = 104.8 - 3267/(L_{S1} + 0.4266R_1 + \sin(-501.3L_{S1}))$$

$$V_{85,1} = 104.8 - 3267/(23 + 0.4266 \cdot 381.97 + \sin(-501.3 \cdot 23))$$

$$V_{85,1} = 87.21 \text{ km/h}$$

Sitio 7

$$R_7 = 286.48 \text{ m}$$

$$L_{S7} = 23.00 \text{ m}$$

$$V_{85,7} = 104.8 - 3267/(L_{S7} + 0.4266R_7 + \sin(-501.3L_{S7}))$$

$$V_{85,7} = 104.8 - 3267/(23 + 0.4266 \cdot 286.48 + \sin(-501.3 \cdot 23))$$

$$V_{85,7} = 82.26 \text{ km/h}$$

Sitio 9

$$R_9 = 381.97 \text{ m}$$

$$L_{S9} = 23.00 \text{ m}$$

$$V_{85,9} = 104.8 - 3267 / (L_{S9} + 0.4266R_9 + \sin(-501.3L_{S9}))$$

$$V_{85,9} = 104.8 - 3267 / (23 + 0.4266 \cdot 381.97 + \sin(-501.3 \cdot 23))$$

$$V_{85,9} = 87.21 \text{ km/h}$$

Sitio 11

$$R_{11} = 572.96 \text{ m}$$

$$L_{S11} = 23.00 \text{ m}$$

$$V_{85,11} = 104.8 - 3267 / (L_{S11} + 0.4266R_{11} + \sin(-501.3L_{S11}))$$

$$V_{85,11} = 104.8 - 3267 / (23 + 0.4266 \cdot 572.96 + \sin(-501.3 \cdot 23))$$

$$V_{85,11} = 92.57 \text{ km/h}$$

3.4.2. Velocidad de operación en tangentes.

Ejemplos del cálculo de la velocidad de operación en tangentes, en la Ruta Nacional 14, utilizando el modelo propuesto por Lamm et al. (1999).

Para el cálculo de la velocidad de operación en tangentes, es necesario determinar si la tangente es o no independiente, para ello es necesario establecer L_{Tmin} y L_{Tmax} con el objetivo de diferenciar entre los tres casos siguientes:

- caso 1: $L_T \leq L_{Tmin}$ la tangente no es independiente, no se alcanza acelerar hasta $V_{85,n+1}$;
- caso 2: $L_T \geq L_{Tmax}$ la tangente es independiente, se alcanza a acelerar hasta V_{des} ;

- caso 3: $L_{Tmin} < L_T < L_{Tmax}$ la tangente es independiente, se alcanza a acelerar hasta $V_{85,n+1}$.

El procedimiento para determinar la velocidad de operación en tangentes, dependerá del caso que sea y se utilizarán las ecuaciones 3.4 y 3.5.

Sitio 2

$$L_{T2} = 131.96 \text{ m}$$

$$V_{85,1} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$V_{85,3} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin} = |V_{85,n-1}^2 - V_{85,n+1}^2| / 25.92 \cdot a \quad (3.4.)$$

$$L_{Tmin2} = |V_{85,1}^2 - V_{85,3}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmin2} = |87.21^2 - 87.21^2| / 25.92 \cdot 0.85$$

$$L_{Tmin2} = 0 \text{ m}$$

La longitud de tangente del sitio 2 es mayor que la longitud de tangente mínima, se descarta el caso 1. Para determinar si los conductores alcanzan la velocidad deseada, es necesario establecer la longitud de tangente máxima utilizando la ecuación 3.5.

$$L_{Tmax} = |2 \cdot V_{des}^2 - V_{85,n-1}^2 - V_{85,n+1}^2| / 25.92 \cdot a \quad (3.5.)$$

$$V_{des} = 100 \text{ km/h}$$

$$L_{Tmax2} = |2 \cdot V_{des}^2 - V_{85,1}^2 - V_{85,3}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmax2} = |2 \cdot 100^2 - 87.21^2 - 87.21^2| / 25.92 \cdot 0.85$$

$$L_{Tmax2} = 217.36 \text{ m}$$

En este sitio se cumple el caso 3, la longitud de tangente del sitio 2 es menor que la longitud de tangente máxima, se concluye que la tangente es independiente pero no se logra alcanzar la velocidad deseada, por lo tanto, se utiliza la ecuación 3.3 para determinar la velocidad de operación en tangente.

$$V_{85,T} = \sqrt{12.04 \cdot a \cdot (L_T - L_{Tmin}) + V_{85,n-1}^2} \quad (3.3.)$$

$$V_{85,T2} = \sqrt{12.04 \cdot a \cdot (L_T - L_{Tmin2}) + V_{85,1}^2}$$

$$V_{85,T2} = \sqrt{12.04 \cdot 0.85 \cdot (131.96 - 0) + 87.21^2}$$

$$V_{85,T2} = 94.64 \text{ km/h}$$

Sitio 4

$$L_{T4} = 222.49 \text{ m}$$

$$V_{85,3} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$V_{85,5} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin4} = |V_{85,3}^2 - V_{85,5}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmin4} = |87.21^2 - 87.21^2| / 25.92 \cdot 0.85$$

$$L_{Tmin4} = 0 \text{ m}$$

Longitud de tangente del sitio 4 es mayor que la longitud de tangente mínima, se descarta el caso 1, es necesario establecer la longitud de tangente máxima utilizando la ecuación 3.5.

$$V_{des} = 100 \text{ km/h}$$

$$L_{Tmax4} = |2 \cdot V_{des}^2 - V_{85,3}^2 - V_{85,5}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmax4} = |2 \cdot 100^2 - 87.21^2 - 87.21^2| / 25.92 \cdot 0.85$$

$$L_{Tmax4} = 217.36 \text{ m}$$

En este sitio se cumple el caso 2, la longitud de tangente del sitio 4 es mayor que la longitud de tangente máxima, se determinó que se logra alcanzar la velocidad deseada, por lo tanto, la velocidad de operación en tangente del sitio 4 es igual a la velocidad deseada, ecuación 3.2.

$$V_{85,T} = V_{des} \tag{3.2.}$$

$$V_{85,T4} = V_{des}$$

$$V_{85,T4} = 100 \text{ km/h}$$

Sitio 6

$$L_{T6} = 55.05 \text{ m}$$

$$V_{85,5} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$V_{85,7} = 82.26 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin6} = |V_{85,5}^2 - V_{85,7}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmin6} = |87.21^2 - 82.26^2| / (25.92 \cdot 0.85)$$

$$L_{Tmin6} = 38.08 \text{ m}$$

La longitud de tangente del sitio 6 es mayor que la longitud de tangente mínima, se descarta el caso 1, es necesario establecer la longitud de tangente máxima utilizando la ecuación 3.5.

$$V_{des} = 100 \text{ km/h}$$

$$L_{Tmax6} = |2 \cdot V_{des}^2 - V_{85,5}^2 - V_{85,7}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmax6} = |2 \cdot 100^2 - 87.21^2 - 82.26^2| / (25.92 \cdot 0.85)$$

$$L_{Tmax6} = 255.43 \text{ m}$$

En este sitio se cumple el caso 3, se determinó que la tangente es independiente y no se logra alcanzar la velocidad deseada. Para establecer la velocidad de operación en tangente del sitio 6 se utiliza la ecuación 3.3.

$$V_{85,T6} = \sqrt{12.04 \cdot a \cdot (L_{T6} - L_{Tmin6}) + V_{85,5}^2}$$

$$V_{85,T6} = \sqrt{12.04 \cdot 0.85 \cdot (55.05 - 38.08) + 87.21^2}$$

$$V_{85,T6} = 88.20 \text{ km/h}$$

Sitio 16

$$L_{T16} = 25.67 \text{ m}$$

$$V_{85,15} = 82.26 \text{ km/h}$$

$$V_{85,17} = 67.14 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin16} = |V_{85,15}^2 - V_{85,17}^2| / 25.92 \cdot a$$

$$L_{Tmin16} = |82.26^2 - 67.14^2| / 25.92 \cdot 0.85$$

$$L_{Tmin16} = 102.53 \text{ m}$$

En este sitio se cumple el caso 1, la longitud de tangente 16 es menor que la longitud de tangente mínima, la tangente no es independiente y no se

alcanza acelerar hasta $V_{85,17}$, Para establecer la velocidad de operación en tangente del sitio 16 se utiliza la ecuación 3.1.

$$V_{85,T} = (V_{85,n-1} + V_{85,n+1})/2 \quad (3.1.)$$

$$V_{85,T16} = (V_{85,15} + V_{85,17})/2$$

$$V_{85,T16} = (82.26 + 67.14)/2$$

$$V_{85,T16} = 74.70 \text{ km/h}$$

3.5. Velocidades medidas de operación.

Para obtener las velocidades de operación reales se realizó una ronda de mediciones utilizando pistolas radar en el tramo Alotenango-Las Lajas, resultados que se presentan en la tabla 3.4, columna 11.

Tabla 3.4. V₈₅ estimado y V₈₅ medido, RN-14 Sacatepéquez.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
No.		Valores en curvas horizontales			Valores en tangentes				V ₈₅	V ₈₅
	Radios, Tangentes	L _c	L _s	V _{85,C}	L _{Tmin}	L _{Tmax}	Ca	V _{85,T}	Estimado	Medido
#	m	m	m	km/h	m	m	-	km/h	km/h	km/h
1	R = 381.97	81.37	23	87.21					87.21	74.90
2	T = 131.96		-		0.00	217.36	3	94.64	94.64	73.00
3	R = 381.97	171.86	23	87.21					87.21	81.40
4	T = 222.49		-		0.00	217.36	2	100.00	100.00	79.30
5	R = 381.97	53.66	23	87.21					87.21	79.40
6	T = 55.05		-		38.08	255.43	3	88.20	88.20	78.00
7	R = 286.48	68.23	23	82.26					82.26	76.80
8	T = 199.54		-		38.08	255.43	3	91.76	91.76	74.00
9	R = 381.97	72.37	23	87.21					87.21	77.55
10	T = 104.98		-		43.74	173.62	3	90.73	90.73	77.25
11	R = 572.96	67.52	23	92.57					92.57	81.70
12	T = 179.49		-		0.00	129.88	2	100.00	100.00	79.00
13	R = 572.96	40.27	23	92.57					92.57	80.15
14	T = 485.88		-		81.81	211.70	2	100.00	100.00	84.00
15	R = 286.48	61.39	23	82.26					82.26	75.20
16	T = 25.67		-		102.53	NIT	1	74.70	74.70	74.00
17	R = 143.24	36.46	25	67.14					67.14	77.70
18	T = 25.87		-		11.53	510.10	3	68.22	68.22	72.80
19	R = 127.32	41.04	28	65.22					65.22	64.80
20	T = 9.63		-		23.07	NIT	1	63.21	63.21	69.00
21	R = 76.39	41.43	42	61.20					61.20	62.00
22	T = 32.11		-		74.87	NIT	1	67.33	67.33	61.65
23	R = 190.99	62.76	23	73.45					73.45	69.00
24	T = 79.91		-		0.00	418.04	3	78.82	78.82	60.75
25	R = 190.99	36.01	23	73.45					73.45	68.95
26	T = 46.78		-		100.34	NIT	1	80.33	80.33	60.00
27	R = 381.97	75.90	23	87.21					87.21	78.20
28	T = 4.46		-		172.59	NIT	1	74.44	74.44	69.20
29	R = 95.49	18.07	36	61.67					61.67	72.80
30	T = 161.17		-		101.33	461.20	3	66.45	66.45	72.00

Fuente: Elaboración propia.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
No.		Valores en curvas horizontales			Valores en tangentes				V ₈₅	V ₈₅
	Radios, Tangentes	L _c	L _s	V _{85,C}	L _{Tmin}	L _{Tmax}	Ca	V _{85,T}	Estimado	Medido
#	m	m	m	km/h	m	m	-	km/h	km/h	km/h
31	R = 229.18	76.17	23	77.69					77.69	82.10
32	T = 59.24		-		29.09	388.95	3	79.65	79.65	86.00
33	R = 190.99	169.84	23	73.45					73.45	72.00
34	T = 16.22		-		74.98	NIT	1	67.32	67.32	71.80
35	R = 63.66	42.50	47	61.18					61.18	52.50
36	T = 29.58		-		12.73	555.27	3	62.57	62.57	57.00
37	R = 114.59	37.82	31	63.43					63.43	62.80
38	T = 35.18		-		41.76	NIT	1	66.87	66.87	72.00
39	R = 163.70	52.64	24	70.31					70.31	72.50
40	T = 17.95		-		82.75	NIT	1	76.29	76.29	66.50
41	R = 286.48	39.83	23	82.26					82.26	75.00
42	T = 192.04		-		82.75	376.26	3	88.80	88.80	64.40
43	R = 163.70	73.29	24	70.31					70.31	63.70

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Perfil de velocidades.

Para la construcción del perfil de velocidades, se tomaron 2.5 km de terreno llano y 2.5 km de terreno montañoso, para demostrar los límites de aplicación del modelo, y, que no se haga mal uso éste.

3.6.1. Perfil de velocidades estimadas.

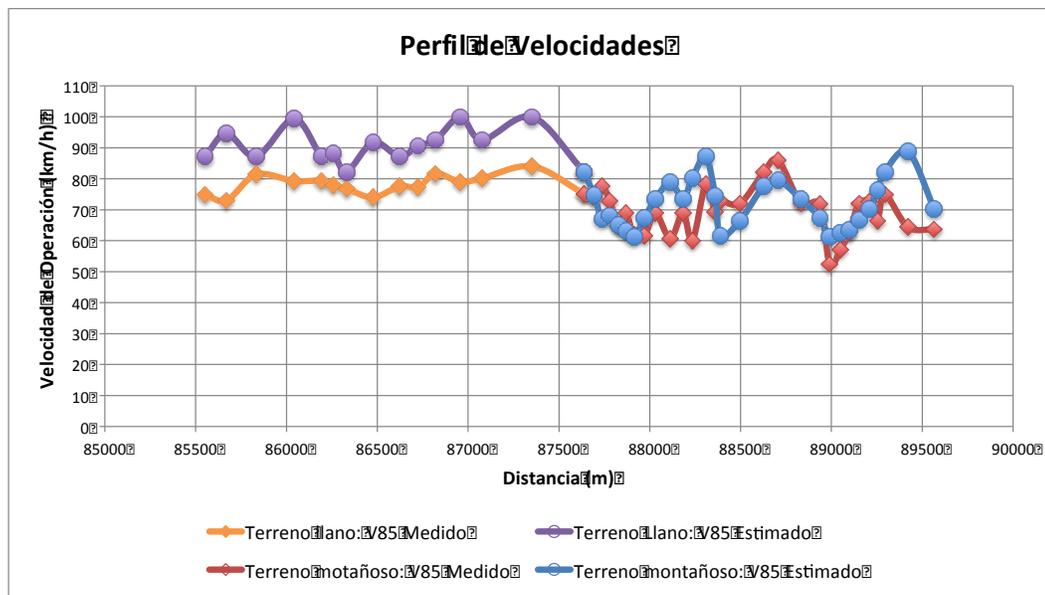
El perfil de velocidad de operación obtenido a partir de los modelos propuestos corresponden a un perfil teórico, para su construcción fue necesario conocer la geometría del tramo, dado que no se contaba con los planos de construcción, se realizó la restitución de la geometría, para obtener las variables independientes que se listan en la tabla 3.3.

3.6.2. Perfil de velocidades medidas.

Para construir el perfil de velocidad de operación real se realizó una ronda de mediciones en cada sitio que forman el tramo estudiado, el cual se presentó en la tabla 3.4.

3.7. Comparativa velocidad estimada vs. velocidad medida.

Se realizó una comparativa entre el perfil de velocidad medido y el perfil de velocidad estimado, con el objetivo de visualizar diferencias entre las velocidades estimadas y las velocidades medidas en el tramo Alotenango-Las Lajas en la ruta RN-14, ubicado en el depto. de Sacatepéquez, los perfiles se muestran en la figura 3.3.

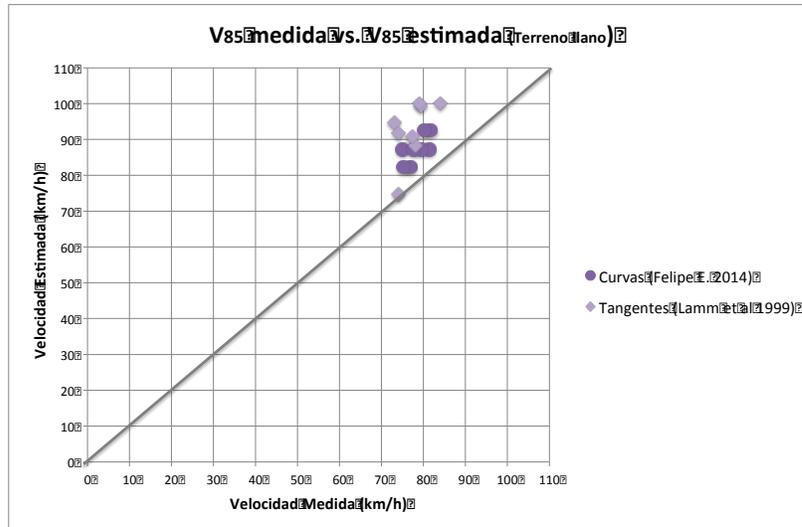


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3. Perfil de velocidad medida y perfil de velocidad estimada.

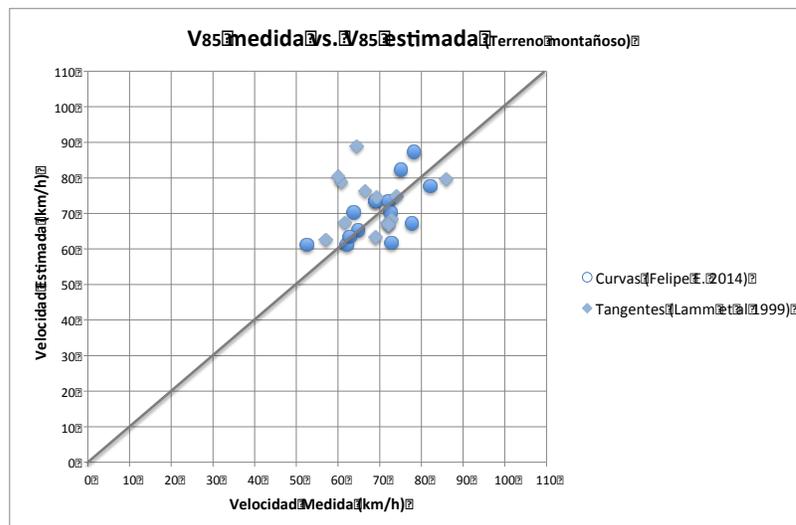
Del estacionamiento 85+000 al 87+500 el terreno es llano, y, del estacionamiento 87+500 al 90+000 el terreno es montañoso, como puede

observarse en el sub-tramo llano, las velocidades estimadas y medidas no coinciden, a diferencia del sub-tramo montañoso en donde las velocidades medidas y estimadas sí coinciden.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Velocidad medida vs velocidad estimada (Terreno llano).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Velocidad medida vs velocidad estimada (Terreno montañoso).

La figura 3.4 muestra la relación entre las velocidades medidas y las velocidades estimadas, en el sub-tramo llano existe un desfase, el objetivo es demostrar que los cambios de velocidades de operación obedecen al tipo de terreno. A diferencia del gráfico del terreno llano, la figura 3.5 muestra la relación de velocidades en terreno montañoso, que es el objetivo de este capítulo validar si el modelo es transferible y cómo puede observarse el modelo para curvas horizontales (Felipe E. 2014) y el modelo para tangentes (Lamm et al. 1999), predicen, adecuadamente, la velocidad de operación debido a que se ajustan a la recta a 45° lo cual significa que coinciden con la realidad.

3.8. Análisis estadístico.

Después de comparar, gráficamente, el perfil de velocidad medido y el perfil de velocidad estimado, fue necesario un análisis estadístico para corroborar los resultados obtenidos en el inciso anterior, por lo que se comprobó la igualdad de las varianzas de los perfiles, por medio de la prueba de Levene que es la que emplea SPSS.

Además, para determinar si existen diferencias significativas entre los perfiles de velocidades se realizó un análisis de varianza de una vía (One-Way ANOVA), los resultados obtenidos se presentan en las tablas 3.5 a la 3.7 para terreno llano, y, en las tablas 3.8 a la 3.10 para terreno montañoso.

Sub-tramo de terreno llano.

Tabla 3.5. Prueba de homogeneidad de varianzas (Terreno llano).
V₈₅.

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
5.408	1	28	0.028

Fuente: IBM SPSS Statistics Versión 21.

Tabla 3.6. Descriptivos (Terreno llano).

V₈₅

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
V85 m.	15	78.1100	3.05890	0.78980	76.4160	79.8040	73.00	84.00
V85 e	15	90.8820	5.79007	1.49499	87.6756	94.0884	82.26	100.00
Total	30	84.4960	7.93024	1.44786	81.5348	87.4572	73.00	100.00

Fuente: IBM SPSS Statistics Versión 21.

Tabla 3.7. ANOVA (Terreno llano).

V₈₅

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1223.430	1	1223.430	57.061	0.000
Within Groups	600.344	28	21.441		
Total	1823.774	29			

Fuente: IBM SPSS Statistics Versión 21.

El nivel de significancia, según la prueba de Levene es menor que 0.05, por lo tanto, se rechaza la Ho y se concluye que la varianza no es homogénea y en la tabla ANOVA el nivel de significancia es menor de 0.05 por lo que se rechaza la Ho y se concluye que los grupos son diferentes.

Sub-tramo de terreno montañoso.

Tabla 3.8. Prueba de homogeneidad de varianzas (Terreno montañoso).
V₈₅.

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.242	1	54	0.624

Fuente: IBM SPSS Statistics Versión 21.

Tabla 3.9. Descriptivos (Terreno montañoso).

V₈₅

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
V85 m.	28	68.9696	7.54699	1.42625	66.0432	71.8961	52.50	86.00
V85 e	28	71.5346	7.76493	1.46743	68.5237	74.5456	61.68	88.80
Total	56	70.2521	7.69639	1.02847	68.1910	72.3132	52.50	88.80

Fuente: IBM SPSS Statistics Versión 21.

Tabla 3.10. ANOVA (Terreno montañoso).

V₈₅

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	92.109	1	92.109	1.571	0.215
Within Groups	3165.782	54	58.626		
Total	3257.891	55			

Fuente: IBM SPSS Statistics Versión 21.

El nivel de significancia, según la prueba de Levene es mayor que 0.05, por lo tanto, no se rechaza la Ho y se concluye que la varianza es homogénea, y, en la tabla ANOVA el nivel de significancia es mayor que 0.05 por lo que no se rechaza la Ho y se concluye que los grupos son iguales.

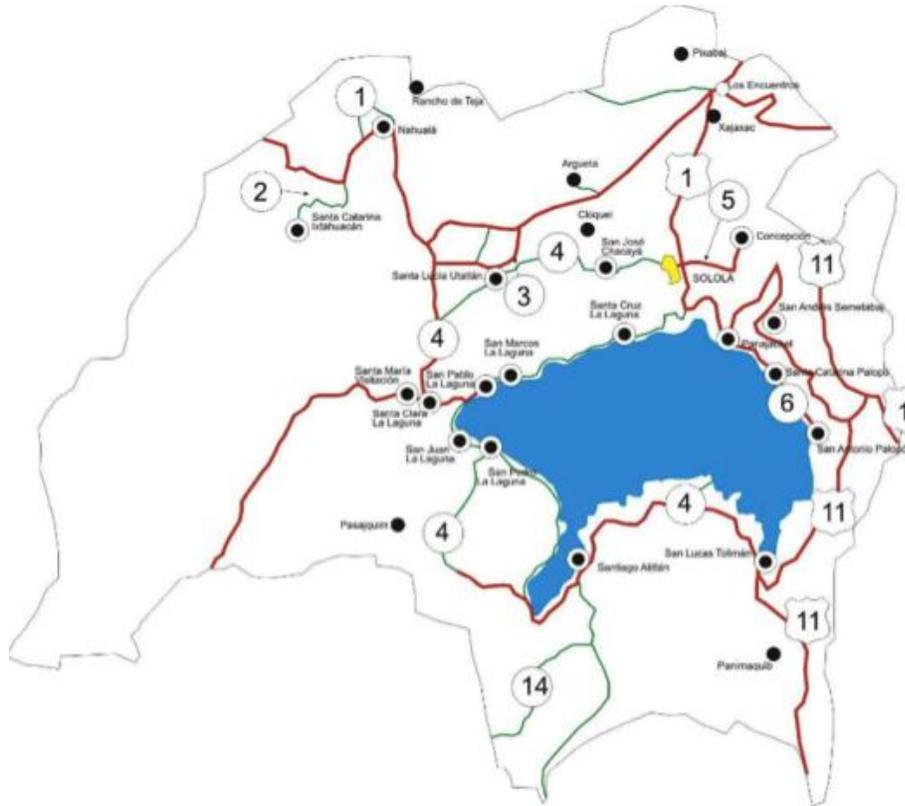
3.9. Conclusiones obtenidas de los resultados.

1. La comprobación del modelo desarrollado proporcionó resultados satisfactorios, después de comparar las velocidades medidas con las velocidades estimadas.
2. Se demostró que los parámetros usados para el diseño de caminos no varían, según la zona del país, sino más bien, varían por la topografía del terreno.
3. Por los resultados estadísticos obtenidos, se concluye que el modelo para caminos de montaña desarrollado en Baja Verapaz es transferible a otros departamentos del país.

4. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL TRAZADO .

4.1. Área para el análisis de consistencia.

El departamento que se seleccionó para la aplicación práctica del modelo desarrollado en Baja Verapaz, fue el departamento de Sololá, debido a que su orografía es idónea para realizar el análisis de consistencia del trazado, este departamento está enclavado sobre la Sierra Madre, la cual hace que posea un paisaje abrupto, con montañas y quebradas profundas.



Fuente: Dirección General de Caminos (2014), *mapas de red vial por departamento*. Disponible: http://www.caminos.gob.gt/public_html/mapa/redvial/Solola.swf.

Figura 4.1. Mapa del departamento de Sololá.

4.2. Información de la ruta seleccionada.

La ruta del departamento que se seleccionó para realizar el análisis de consistencia, fue la Ruta Nacional 11, debido a que posee las condiciones que se presentan a continuación.

Ruta Nacional 11 (RN-11):

Tipo de zona: rural;

Carriles: dos, uno en cada sentido;

Superficie de rodadura: asfalto;

Topografía: montañosa;

Tramo: San Gabriel – Santa Alicia;

Longitud del tramo: 5 km;

Estacionamiento: inicio 146+000.00 - final 151+000.00;

Coordenadas: inicio 14°38'00.9"N, 91°07'37.9"W - final 14°37'07.4"N, 91°08'28.1"W.



Fuente: Google Earth Pro.

Figura 4.2. Imagen satelital tramo San Gabriel – Santa Alicia.

En el presente capítulo se realiza un estudio de caso, en el departamento de Sololá para demostrar la aplicación práctica del modelo desarrollado en Baja Verapaz y validado en Sacatepéquez.

4.3. Aplicación práctica del modelo desarrollado.

4.3.1. Velocidad de operación en curvas horizontales.

Ejemplo del cálculo de la velocidad de operación en curvas horizontales, utilizando la ecuación 2.3 de aplicación nacional en caminos de montaña, desarrollada en el Depto. de Baja Verapaz y validada en el departamento de Sacatepéquez.

$$V_{85} = 104.8 - 3267 / (L_s + 0.4266R + \sin(-501.3L_s)) \quad (2.3.)$$

Sitio 1

$$R_1 = 143.24m$$

$$L_{s1} = 25.00m$$

$$V_{85,1} = 104.8 - 3267 / (25 + 0.4266 \cdot 143.24 + \sin(-501.3 \cdot 25))$$

$$V_{85,1} = 67.14 \text{ km/h}$$

Sitio 3

$$R_3 = 114.59m$$

$$L_{s3} = 31.00m$$

$$V_{85,3} = 104.8 - 3267 / (31 + 0.4266 \cdot 114.59 + \sin(-501.3 \cdot 31))$$

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

Sitio 5

$$R_5 = 190.99m$$

$$L_{s5} = 23.00m$$

$$V_{85,5} = 104.8 - 3267 / (23 + 0.4266 \cdot 190.99 + \sin(-501.3 \cdot 23))$$

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

Los valores de la velocidad de operación calculados para cada curva dentro de los 5 km del tramo en estudio, se listan en la tabla 4.3, columna 5.

4.3.2. Velocidad diseño y velocidad deseada.

Para determinar la velocidad de diseño del alineamiento, se restituyó la geometría del trazado en planta y por medio de los radios y clotoides que se presentan en el anexo 2 “Elementos de diseño para curvas horizontales y velocidad de diseño, peralte (e) máx. 8%”, de la DGC, se determinó los parámetros de diseño de cada curva.

Sitio 1

$$R_1 = 143.24m$$

$$L_{s1} = 25.00m$$

$$V_{d,1} = 40.00 \text{ km/h}$$

Sitio 3

$$R_3 = 114.59m$$

$$L_{s3} = 31.00m$$

$$V_{d,3} = 40.00 \text{ km/h}$$

Sitio 5

$$R_5 = 190.99m$$

$$L_{s5} = 23.00m$$

$$V_{d,5} = 40.00 \text{ km/h}$$

Los valores de la velocidad de diseño obtenidos para cada curva dentro del tramo en estudio, se listan en la tabla 4.3, columna 6.

La velocidad deseada, que se utilizó fue la determinada en Baja Verapaz (100 km/h).

$$V_{des} = 100.00 \text{ km/h}$$

4.3.3. Velocidad de operación en tangentes.

Ejemplos del cálculo de la velocidad de operación en tangentes del tramo en estudio, utilizando la ecuación desarrollada por Lamm et al. en 1999.

Para el cálculo de la velocidad de operación en las tangentes, es necesario determinar si la tangente es o no independiente, para ello es preciso establecer la longitud de tangente mínima y máxima, por medio de las ecuaciones 3.4 y 3.5.

Sitio 2

$$L_{T2} = 53.83 \text{ m}$$

$$V_{85,1} = 67.14 \text{ km/h}$$

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin} = |V_{85,n-1}^2 - V_{85,n+1}^2| / (25.92 \cdot a) \quad (3.4.)$$

$$L_{Tmin2} = |67.14^2 - 63.43^2| / (25.92 \cdot 0.85)$$

$$L_{Tmin2} = 21.99 \text{ m}$$

La longitud de tangente en el sitio 2 es mayor que la longitud de tangente mínima, se descarta el caso 1, para establecer si corresponde al caso 2 o 3, es necesario determinar la longitud de tangente máxima utilizando la ecuación 3.5.

$$L_{Tmax} = |2 \cdot V_{des}^2 - V_{85,n-1}^2 - V_{85,n+1}^2| / (25.92 \cdot a) \quad (3.5.)$$

$$V_{des} = 100 \text{ km/h}$$

$$V_{85,1} = 67.14 \text{ km/h}$$

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmax2} = |2 \cdot 100^2 - 67.14^2 - 63.43^2| / (25.92 \cdot 0.85)$$

$$L_{Tmax2} = 520.55 \text{ m}$$

La tangente es independiente en el sitio 2 y cumple con el caso 3, es decir que, la longitud de tangente analizada es mayor que la longitud de tangente mínima y es menor que la longitud de tangente máxima. El caso 3 indica que se logra acelerar pero no se alcanza la velocidad deseada. Para determinar la velocidad que se logra alcanzar se utiliza la ecuación 3.3.

$$V_{85T} = \sqrt{12.04 \cdot a \cdot (L_T - L_{Tmin}) + V_{85,n-1}^2} \quad (3.3.)$$

$$L_{T2} = 53.83 \text{ m}$$

$$L_{Tmin2} = 21.99 \text{ m}$$

$$V_{85,1} = 67.14 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$V_{85,T2} = \sqrt{12.04 \cdot 0.85 \cdot (53.83 - 21.99) + 67.14^2}$$

$$V_{85,T2} = 69.52 \text{ km/h}$$

Sitio 4

$$L_{T4} = 50.53 \text{ m}$$

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin4} = |63.43^2 - 73.45^2| / (25.92 \cdot 0.85)$$

$$L_{Tmin4} = 62.25 \text{ m}$$

Con el resultado obtenido se establece que este sitio cumple con el caso 1, es decir, la longitud de tangente es menor a la longitud de tangente mínima, la tangente no es independiente y no se alcanza acelerar hasta $V_{85,5}$, Para establecer la velocidad de operación en la tangente del sitio 4 se utiliza la ecuación 3.1.

$$V_{85,T} = (V_{85,n-1} + V_{85,n+1})/2 \quad (3.1.)$$

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

$$V_{85,T4} = (63.43 + 73.45)/2$$

$$V_{85,T4} = 68.44 \text{ km/h}$$

Sitio 6

$$L_{T6} = 51.93 \text{ m}$$

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

$$V_{85,7} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$a = 0.85 \text{ m/s}^2$$

$$L_{Tmin6} = |73.45^2 - 87.21^2| / (25.92 \cdot 0.85)$$

$$L_{Tmin6} = 100.34 \text{ m}$$

En este sitio se cumple el caso 1, para establecer la velocidad de operación en tangente del sitio 6 se utiliza la ecuación 3.1.

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

$$V_{85,7} = 87.21 \text{ km/h}$$

$$V_{85,T6} = (73.45 + 87.21) / 2$$

$$V_{85,T6} = 80.33 \text{ km/h}$$

Los valores obtenidos se listan en la tabla 4.3, L_{Tmin} y L_{Tmax} columna 8 y 9, respectivamente, número de caso columna 10 y velocidad de operación en tangente columna 11.

4.3.4. Resultados del criterio de seguridad I.

Se aplicó el criterio de seguridad I, desarrollado por Lamm et al. en 1999, para comparar la velocidad de operación con la velocidad de diseño para curvas y tangentes. Para calcular el criterio de seguridad I se utiliza la ecuación 1.4.

$$SCI = |V_{85,n} - V_d| \tag{1.4.}$$

Tabla 4.1. Clasificación del criterio de diseño I.

Diseño	Color	Clasificación
		Diferencia de velocidad [km/h]
Bueno		$ V_{85n} - V_d < 10$
Tolerable		$10 < V_{85n} - V_d < 20$
Pobre		$ V_{85n} - V_d > 20$

Fuente: Elaboración propia

Sitio 1

$$V_{85,1} = 67.14 \text{ km/h}$$

$$V_{d,1} = 40 \text{ km/h}$$

$$SCI_1 = |67.14 - 40|$$

$$SCI_1 = 27.14 \text{ km/h}$$

(Rojo - Diseño Pobre)

Sitio 2

$$V_{85,2} = 69.52 \text{ km/h}$$

$$V_{d,2} = 40 \text{ km/h}$$

$$SCI_2 = |69.52 - 40|$$

$$SCI_2 = 29.52 \text{ km/h}$$

(Rojo - Diseño Pobre)

Sitio 3

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$V_{d,3} = 40 \text{ km/h}$$

$$SCI_3 = |63.43 - 40|$$

$$SCI_3 = 23.43 \text{ km/h}$$

(Rojo - Diseño Pobre)

Sitio 4

$$V_{85,4} = 68.44 \text{ km/h}$$

$$V_{d,4} = 40 \text{ km/h}$$

$$SCI_4 = |68.44 - 40|$$

$$SCI_4 = 28.44 \text{ km/h}$$

(Rojo - Diseño Pobre)

Sitio 5

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

$$V_{d,5} = 40 \text{ km/h}$$

$$SCI_5 = |73.45 - 40|$$

$$SCI_5 = 33.45 \text{ km/h}$$

(Rojo - Diseño Pobre)

Los valores obtenidos de criterio I para los diferentes sitios dentro del tramo en estudio, se listan en la tabla 4.3, columna 12.

4.3.5. Resultados del criterio de seguridad II.

Se aplicó el criterio de seguridad II de Lamm et al. desarrollado en el año 1999, para determinar la coherencia de la velocidad de operación a lo largo del alineamiento analizado, relacionando la transición (ESC) entre elementos de diseño consecutivo. Para calcular el criterio de seguridad II se utiliza la ecuación 1.5.

$$SCII = |V_{85n} - V_{85,n+1}| \quad (1.5.)$$

Tabla 4.2. Clasificación del criterio de seguridad II.

Diseño	Color	Clasificación
		Diferencia de velocidad [km/h]
Bueno		$ V_{85n} - V_{85n+1} < 10$
Tolerable		$10 < V_{85n} - V_{85n+1} < 20$
Pobre		$ V_{85n} - V_{85n+1} > 20$

Fuente: Elaboración propia.

Transición entre Sitio 1 y 2.

$$V_{85,1} = 67.14 \text{ km/h}$$

$$V_{85,2} = 69.52 \text{ km/h}$$

$$SCII_{1,2} = |67.14 - 69.52|$$

$$SCII_{1,2} = 2.38 \text{ km/h}$$

(Verde - Diseño Bueno)

Transición entre Sitio 2 y 3.

$$V_{85,2} = 69.52 \text{ km/h}$$

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$SCII_{2,3} = |69.52 - 63.43|$$

$$SCII_{2,3} = 6.09 \text{ km/h}$$

(Verde - Diseño Bueno)

Transición entre Sitio 3 y 4.

$$V_{85,3} = 63.43 \text{ km/h}$$

$$V_{85,4} = 68.44 \text{ km/h}$$

$$SCII_{3,4} = |63.43 - 68.44|$$

$$SCII_{3,4} = 5.01 \text{ km/h}$$

(Verde - Diseño Bueno)

Transición entre Sitio 4 y 5.

$$V_{85,4} = 68.44 \text{ km/h}$$

$$V_{85,5} = 73.45 \text{ km/h}$$

$$SCII_{4,5} = |68.44 - 73.45|$$

$$SCII_{4,5} = 5.01 \text{ km/h}$$

(Verde - Diseño Bueno)

Los valores obtenidos de criterio II para los diferentes sitios dentro del tramo en estudio, se listan en la tabla 4.3, columna 13.

Tabla 4.3. Datos numéricos para el proceso de evaluación de seguridad.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
No.		Valores en curvas horizontales				Valores en tangentes					SCI	SCII
	R,T	L_C	L_s	$V_{85,C}$	V_d	V_{des}	L_{Tmin}	L_{Tmax}	Ca	$V_{85,T}$	$ V_{85} - V_d $	$ V_{85} - V_{85} $
#	m	m	m	km/h	km/h	km/h	m	m		km/h	km/h	km/h
1	R=143.24	31.00	25	67.14	40	100					27.14	
												2.38
2	T=53.83				40	100	21.99	520.55	3	69.52	29.52	
												6.09
3	R=114.59	56.78	31	63.43	40	100					23.43	
												5.01
4	T=50.53				40	100	62.25	NIT	1	68.44	28.44	
												5.01
5	R=190.99	166.06	23	73.45	40	100					33.45	
												6.88
6	T=51.93				40	100	100.34	NIT	1	80.33	40.33	
												6.88
7	R=381.97	101.84	23	87.21	40	100					47.21	
												12.54
8	T=104.84				40	100	170.06	NIT	1	74.67	34.67	
												12.55
9	R=88.15	131.03	38	62.12	40	100					22.12	
												7.50
10	T=104.08				40	100	7.47	564.95	3	69.62	29.62	
												8.84
11	R=81.85	85.88	40	60.78	40	100					20.78	
												1.24
12	T=40.27				40	100	25.39	547.03	3	62.02	22.02	
												3.20
13	R=127.32	78.80	28	65.22	40	100					25.22	
												7.70
14	T=184.87				40	100	80.89	440.75	3	72.92	32.92	
												4.77
15	R=229.18	184.87	23	77.69	40	100					37.69	
												10.36
16	T=93.57				40	100	165.61	NIT	1	88.05	48.05	
												10.36
17	R=1145.92	96.18	23	98.41	40	100					58.41	
												14.05
18	T=58.09				40	100	215.19	NIT	1	84.36	44.36	

Fuente: Elaboración propia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
No.		Valores en curvas horizontales					Valores en tangentes				SCI	SCII
	R,T	L_c	L_s	$V_{85,c}$	V_d	V_{des}	L_{Tmin}	L_{Tmax}	Ca	$V_{85,r}$	$ V_{85} - V_d $	$ V_{85} - V_{85} $
#	m	m	m	km/h	km/h	km/h	m	m		km/h	km/h	km/h
												14.05
19	R=163.70	117.13	24	70.31	40	100					30.31	
												3.67
20	T=41.74				40	100	44.40	NIT	1	66.64	26.64	
												3.67
21	R=104.17	69.83	33	62.97	40	100					22.97	
												2.48
22	T=38.50				40	100	7.35	555.17	3	65.45	25.45	
												3.78
23	R=95.49	12.48	36	61.67	40	100					21.67	
												8.61
24	T=42.54				40	100	82.94	NIT	1	53.06	13.06	
												8.61
25	R=67.41	1.97	26	44.45	30	100					14.45	
												8.84
26	T=177.34				40	100	92.94	635.48	3	53.29	13.29	
												10.14
27	R=114.59	77.85	31	63.43	40	100					23.43	
												5.67
28	T=53.73				40	100	59.51	NIT	1	57.76	17.76	
												5.68
29	R=63.66	106.06	34.70	52.08	30	100					22.08	
30	R=81.85	94.07	19.54	44.90	30	100					14.90	7.18
												9.27
31	T=24.38				40	100	91.11	NIT	1	54.17	14.17	
												9.26
32	R=114.59	60.88	31	63.43	40	100					23.43	
												9.42
33	T=2.07				40	100	124.52	NIT	1	72.85	32.85	
												9.41
34	R=286.48	91.95	23	82.26	40	100					42.26	
												8.57
35	T=258.95				40	100	114.06	407.57	3	90.83	50.83	
												25.61
36	R=127.32	105.97	28	65.22	40	100					25.22	
												2.21

Fuente: Elaboración propia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
No.		Valores en curvas horizontales						Valores en tangentes				SCI	SCII
	R,T	L_c	L_s	$V_{85,c}$	V_d	V_{des}	L_{Tmin}	L_{Tmax}	Ca	$V_{85,r}$	$ V_{85} - V_d $	$ V_{85} - V_{85} $	
#	m	m	m	km/h	km/h	km/h	m	m		km/h	km/h	km/h	
37	T=57.95				40	100	29.29	550.92	3	67.43	27.43		
												7.36	
38	R=57.30	92.47	49	60.07	40	100					20.07		
												7.01	
39	T=103.33				40	100	16.20	564.01	3	67.08	27.08		
												4.11	
40	R=104.17	70.18	33	62.97	40	100					22.97		
												18.15	
41	T=255.61				40	100	0.00	547.82	3	81.12	41.12		
												18.15	
42	R=104.17	103.28	33	62.97	40	100					22.97		
												5.82	
43	T=87.18				40	100	12.30	560.12	3	68.79	28.79		
												8.01	
44	R=81.85	76.60	40	60.78	40	100					20.78		

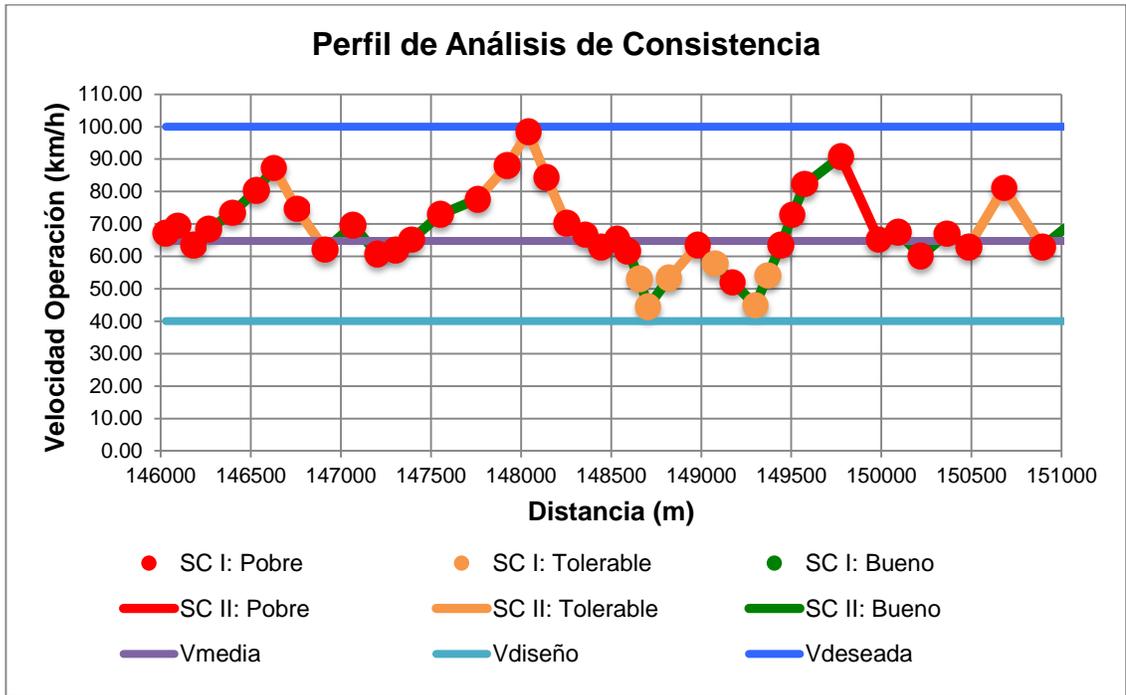
Fuente: Elaboración propia

Referencias

- diseño bueno [verde],
- diseño tolerable [anaranjado],
- diseño pobre [rojo].

4.4. Perfil de análisis de consistencia.

Los círculos representan el punto medio de los sitios, según el criterio I de Lamm et al., (1999) y la líneas representan el criterio II de Lamm et al., (1999), la línea celeste simboliza la velocidad de diseño, la línea morada la velocidad media del tramo y, por último, la línea azul representa la velocidad deseada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Perfil consistencia del trazado.

4.5. Evaluación de consistencia del trazado.

Como puede observarse en el perfil según el criterio I, el tramo en su mayoría tiene un diseño pobre y según el criterio II, el tramo se clasifica como tolerable a bueno.

4.6. Análisis de resultados.

Según resultados obtenidos del análisis de consistencia utilizando el criterio I, el diseño se presenta como pobre en un 91% del tramo y utilizando el criterio II el diseño se encuentra clasificado como bueno en un 70%.

Tabla 4.4. Resumen de la evaluación de la consistencia.

Análisis de la consistencia del trazado				
RN-11 Sololá				
Diseño	SC I		SC II	
	Cantidad de sitios	Longitud (m / %)	Cantidad de sitios	Longitud (m / %)
Bueno	0	0 / 0	34	3683.50 / 70
Tolerable	6	485.11 / 9	9	1346.52 / 25
Pobre	38	4803.86 / 91	1	258.95 / 5
Total	44	5288.97 / 100	44	5288.97 / 100

Fuente: Elaboración propia.

Esto se debe a que el criterio I, evalúa la seguridad comparando la velocidad de operación con la velocidad de diseño, lo que demuestra que la selección de la velocidad de diseño del tramo analizado no tiene coherencia con la velocidad de operación.

La aclaración de que la selección de la velocidad de diseño tiene que ser coherente con la velocidad de operación se incluyó hasta en el año 2011 en el libro verde de la AASHTO, y, la última versión del manual centroamericano, es del año 2004; el contenido del mismo está basado en el libro verde de la AASHTO lo que hace de suma importancia actualizar dicho manual con los últimos avances en investigación referente a diseño geométrico de caminos.

Para solucionar dicho problema Lamm et al (1999), propuso que la velocidad de diseño en tramos en donde se desconociera la velocidad de diseño, la velocidad de diseño debería sustituirse por la velocidad promedio estimada, este no es nuestro caso ya que si se pudo determinar la velocidad de diseño, pero podría aplicarse dicho principio.

En cuanto al criterio II, el cual evalúa la coherencia entre elementos sucesivos, éste permite representar, adecuadamente, el aumento en las prestaciones del parque automotor del área y deja mayor libertad a los diseñadores en caso de encontrar un obstáculo en el trazado permitiendo disminuir la velocidad en forma gradual y retornar de nuevo a la velocidad en forma gradual, es decir, permite que en un tramo haya sub-tramos diseñados con una mayor velocidad que otros, pero, guiando al conductor por la transición en forma gradual.

Actualmente, en Guatemala, cuando se encuentra un obstáculo en el trazado, se disminuye la velocidad de diseño de forma repentina, lo que hace que los conductores se vean sorprendidos dando como resultados altos índices de accidentalidad en dichos puntos y el criterio II demuestra que se puede hacer la transición en forma gradual haciendo que el conductor disminuya también, la velocidad de operación en forma gradual.

Como se demostró en el presente capítulo, el análisis de consistencia permite determinar los sitios inseguros para los conductores pero surge una pregunta ¿en qué parte del actual proceso de diseño debe aplicarse el análisis de consistencia del trazado? La respuesta es que debe aplicarse después del trazado en planta y antes del diseño de la rasante.

La aplicación de los modelos calibrados se limita a caminos de montaña, diseñados siguiendo las recomendaciones de la segunda edición de las normas para el diseño geométrico de las carreteras regionales de diseño geométrico de la SIECA o las de la DGC, ya que los caminos ubicados en terrenos con topografía distinta tienen otras especificaciones para su diseño, y, como ya se explicó, el terreno influye en el trazado y el trazado influye en la velocidad de operación.

CONCLUSIONES

1. La metodología validada para el análisis de consistencia del trazado en caminos de montaña en Guatemala, fue la de Lamm et al. (1999), quien utiliza solamente elementos del trazado en planta para analizar la consistencia del trazado, esto obedeció a dos circunstancias, la primera es que el trazado en planta en terrenos montañosos está, fuertemente, condicionado por la topografía, hecho que se reflejó en las bajas velocidades de diseño que se determinaron al restituir la geometría de las curvas horizontales, la segunda es que en Guatemala se abusa del hecho de que en los manuales de diseño geométrico de caminos no se especifica cuantos sitios se deben enlazar como mínimo antes de cambiar a otra velocidad de diseño, lo cual hizo imposible completar un amplio intervalo de curvas horizontales diseñadas con una sola velocidad de diseño.
2. El modelo para la predicción de velocidades de Guatemala, fue desarrollado con base, en una ruta nacional y una ruta centroamericana dado que ambas rutas son las que exige la SIECA que se diseñen con el manual centroamericano de normas para el diseño geométrico de las carreteras regionales, y, para la selección de los sitios a medir, se tuvo en cuenta las distintas combinaciones geométricas existentes en las dos rutas seleccionadas. Para la clasificación horizontal de las curvas se utilizaron los radios entre la velocidad de diseño de 40 km/h a 90 km/h propuesto por la DGC, para la clasificación vertical de las curvas se utilizaron las 6 combinaciones propuestas por Fitzpatrick et al. (2000). El mayor logro al desarrollar el modelo fue la identificación de las variables geométricas que más influyen en la velocidad de operación en caminos de montaña, las

cuales son: el radio de las curvas horizontales, longitud de la clotoide de transición y la longitud de la tangente, variables que no cambian en el tiempo.

3. El objetivo de validar el modelo en un departamento distinto a donde fue desarrollado fue para demostrar que el modelo es transferible a otros departamentos del país, del cual se obtuvieron resultados satisfactorios gráficamente y estadísticamente, esto obedece a que las rutas nacionales y centroamericanas se diseñan siguiendo las recomendaciones de la SIECA y la DGC, no importando la zona del país. De la comparativa del perfil de velocidades se pudo determinar que la variación de la velocidad de operación no cambia, según la región del país sino más bien, por la topografía del terreno y, finalmente, el mayor logro de la validación fue demostrar que es posible construir el perfil de velocidades de operación de un tramo vial utilizando el modelo de Felipe E. (2014) para curvas horizontales y el modelo de Lamm et al. (1999) para tangentes.
4. La evaluación del nivel de seguridad de un tramo vial utilizando la metodología del análisis de consistencia del trazado propuesto por Lamm et al. (1999), fue posible gracias a que se pudo construir el perfil de velocidades de operación. En cuanto al primer indicador de seguridad empleado se concluye que no ayuda a determinar los sitios inseguros debido a que la velocidad de diseño no se comporta como la velocidad de operación, hecho que se evidenció al clasificar todos los sitios del tramo en un nivel de diseño pobre a tolerable, ahora bien, la aplicación del segundo criterio de seguridad sí ayudó a clasificar los sitios por nivel de seguridad, además este criterio demostró que sí se puede realizar cambios de velocidad pero en forma gradual y no,

drásticamente, como suele ocurrir en las carreteras de Guatemala. El mayor logro que se obtuvo al desarrollar el análisis de consistencia es que se pudo determinar que la metodología de Lamm et al. (1999) y no la de Fitzpatrick et al. (2000), era la adecuada para su aplicación en caminos de montaña en Guatemala, debido a que el trazado en este tipo de terrenos está, fuertemente, influido por la topografía.

5. El mayor logro de la presente tesis es que provee de una herramienta valiosa, complementaria, al diseño tradicional de caminos que ayuda a identificar los sitios inseguros, lo que hace posible abordar el origen de la inseguridad en las carreteras del país y no continuar mitigando los efectos de éste con señalización vertical, horizontal y protecciones laterales etc. Finalmente, la identificación de los sitios inseguros permite a los tomadores de decisiones invertir en las mejoras de estos sitios en el caso de carreteras viejas, y, a los diseñadores, evitar estos sitios en el trazo de caminos nuevos.

REDOMENDACIONES

1. Es muy importante evaluar el nivel de seguridad del trazado de un camino, por lo que se recomienda la metodología empleada en el presente trabajo de graduación como complemento a la metodología recomendada por la SIECA, ya que como se demostró en el capítulo 4 los caminos de montaña en Guatemala están, relativamente, bien diseñados a excepción de algunos sitios, los cuales son necesarios identificarlos para intervenirlos al momento de realizar mejoramientos en los tramos viales.
2. El presente trabajo de graduación se limitó a caminos ubicados en terrenos montañosos, por lo que se recomienda completar la tarea iniciada con modelos para caminos ubicados en terrenos llanos, ondulados y escarpados.
3. Se recomienda que lo entes rectores de vialidad de Guatemala se involucren en la investigación de la seguridad vial en el trazado de caminos, ya que la mayor limitante para le investigación del tema es la falta de información, la efectividad de la herramienta ya se demostró, ahora les corresponde a ellos formar una base de datos suficientemente amplia para futuras investigaciones que bien podrían desarrollar los estudiantes de la Maestría en Ingeniería Vial de la Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4. La investigación de la velocidad de operación debe ampliarse a caminos multicarril, ya que en Guatemala se siguen ampliando los caminos de dos carriles a cuatro, sin ningún criterio que fundamente la elección de la geometría utilizada, sino, más bien, se sigue el simple principio de construir un carril paralelo al camino ya existente, las inversiones en estas obras son altísimas y que no se invierta antes en un análisis geométrico, es inaceptable.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Alexander, G.J., and Lunenfeld, H. (1986). *Driver expectancy in highway design and traffic operations*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
2. American Association Of State Highway And Transportation Officials. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (6ª. Ed.). Washington, D.C.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials (2004). *A policy on geometric design of highways and streets* (5a. Ed.). Washington, D.C.
4. Berardo, M., y Baruzzi, A. (2006). *Análisis de consistencia del diseño en una ruta de la provincia de Córdoba*, XIV Congreso argentino de vialidad y tránsito.
5. Castro, M., Sánchez, J., Néstor, A., and Melo J. (2010). *Speed Models For Highway Consistency Analysis. A Colombian Case Study*. 4th International Symposium on Highway Geometric design.
6. Echaveguren, T. y Sáez, J. (2001). *Relaciones velocidad-geometría horizontal en vías de la VIII región*. X congreso Chileno de ingeniería de transportes.
7. Echaveguren, T. (2012). *Análisis de consistencia de caminos bidireccionales usando mediciones continuas de velocidad de operación obtenidas con GPS*. Revista Ingeniería de Construcción, 27, 55-70.
8. Echaveguren, T. y Cárdenas, E. (2013). *Comparación de métodos de análisis de consistencia de curvas horizontales aisladas usando datos empíricos*. XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.
9. Federal Highway Administration (2003). *Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), Design Consistency Module (DCM) Engineer's Manual*. Washington, D.C., EE. UU.

10. Fitzpatrick, K., Wooldridge, K., Tsimhoni, O., Collins, J., Green, P., Bauer, K. et al. (2000). *Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways*. Washington: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-172.
11. Fitzpatrick, K., Anderson, I., Bauer, K., Collins, J., Elefteriadou, L., Green, P. et al. (2000). *Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways, executive summary*. Washington: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-173.
12. Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., Wooldridge, M. and Miaou, S. (2003). *Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed*. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP report 504. Texas Transportation Institute, College Station, TX.
13. Fitzpatrick, K., Blaschke, J. D., Shamburger, C. B., Krammes, R. A., and Fambro, D. B., (1995). *Compatibility of Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed. Final Report FHWA/TX- 95/1465-2F*. Texas Department of Transportation, College Station, TX.
14. García, R., Martínez, D. y Díaz, E. (2012). *Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de Villa Clara, Cuba*. Revista ingeniería de Construcción, 27, 71-82.
15. Hauer, E. (2000). *Safety in geometric design standards I: Three anecdotes*. International Symposium of Highway Geometric Design, 2nd. Mainz, Germany.
16. Hauer, E. (2005). *The Road Ahead*. Journal of Transportation Engineering, 131, 333-339.
17. Heger, R. (1998). *Driving behavior and driver mental workload as criteria of highway geometric design quality*. Transportation Research Board, Issue Number: E-C003, International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Boston, Massachusetts.

18. Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Ministerio de Transporte (1998). *Manual de Diseño Geométrico para Carreteras*. Bogotá.
19. Krammes, R., Fitzpatrick, K., Blaschke, J. and Fambro, D. (1996). *Speed: Understanding Design, Operating, and Posted Speed*. Texas: Texas Transportation Institute, College Station, Report No.1465-1.
20. Krammes, R., Brackett, R., Shafer, M., Ottessen, J., Anderson, I., Fink, et al. (1995). *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*. Georgetown: Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-94-034.
21. Lamm, R., Beck, A., Rusher, T., Mailander, T., Cafiso, S., and La Cava, G. (2007). *How to make Two-Lane Rural Roads Safer* (1ª. Ed). Great Britain: WIT Press.
22. Lamm, R., Psarianos, B., and Mailaender, T. (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook* (1ª. Ed). New York: Mcgraw-Hill.
23. McLean, J. (1979). *An alternative to the design speed concept for low speed alignment design*. Transportation Research Record, 702, 55–63.
24. Mattar-Habib, C., Polus, A., and Farah, H. (2008). *Further Evaluation of the Relationship between Enhanced Consistency Model and Safety of Two-Lane Rural Roads in Israel and Germany*. European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR), 8(4), 320-332.
25. Musa, T., (2003). *Dynamic driver workload assessment and its implications for highway design and operations* (Doctoral Thesis). University of British Columbia, British.
26. Polus, A. and Mattar-Habib, C. (2004). *A New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety*. Journal of Transportation Engineering, vol. 130, no. 3, pp. 286-293.
27. Secretaría de Planificación Programación de la Presidencia (2010). *Plan de Desarrollo Departamental de Baja Verapaz 2011-2015*, Guatemala.

28. Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2004). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales* (2ª. Ed.). Guatemala.
29. Transportation Research Board, TRB Special Report 254 (1998). *Managing Speed: Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits*. Washington, D.C.

ANEXO 1

Hoja de campo utilizada para las mediciones de velocidad, operación, medidas con pistola radar, fueron objeto de medición solamente los vehículos que viajaban a flujo libre y en condiciones climáticas favorables.

VELOCIDAD DE VEHICULOS (Medidos con Pistola Radar)

Hoja de Campo

Fecha: 20 de Oct. 2013 Tramo: La Union Barrios - Purulhá
 Ruta: Centroamericana 14 Est.: 160+191.5
 Hora Inicio: 10:00 Hora Fin: 12:00

Km/h	Automóviles	Conteo Total	Conteo Acumulado	Automóviles	Total Automóviles	Acumulado Automóviles	Km/h
	Dirección ↑			Dirección ↓			
90							90
89							89
88							88
87							87
86							86
85							85
84							84
83							83
82							82
81							81
80							80
79				I	1	68	79
78					0	67	78
77					0	67	77
76	II	2	78		0	67	76
75	I	1	76	II	2	67	75
74	I	1	75		0	65	74
73	IIII	5	74	III	3	65	73
72	II	2	69	II	2	62	72
71	II	2	67	I	1	60	71
70	I	1	65		0	59	70
69	IIII	5	64	IIII	5	59	69
68	III	3	59	I	1	54	68
67	II	2	56	IIII	4	53	67
66	II	2	54	III	3	49	66
65	II	2	52	I	1	46	65
64	IIII	4	50	III	3	45	64
63	IIII I	6	46	IIII I	6	42	63
62	III	3	40	II	2	36	62
61	IIII II	7	37	IIII	4	34	61
60	IIII I	6	30	IIII I	6	30	60
59	I	1	24	III	3	24	59
58	IIII II	7	23	IIII	4	21	58
57	II	2	16	III	3	17	57
56		0	14	IIII	4	14	56
55	III	4	14	I	1	10	55
54	II	2	10	III	3	9	54
53	II	2	8		0	6	53
52	I	1	6		0	6	52
51	II	2	5	II	2	6	51
50	II	2	3	I	1	4	50
49	I	1	1		0	3	49
48			0		0	3	48
47				II	2	3	47
46					0	1	46
45				I	1	1	45
44						0	44
43							43
42							42
41							41
40							40
Total automóviles			78	Total automóviles			68
Automóvil percentil 85			66.3	Automóvil percentil 85			57.8
Velocidad percentil 85			71	Velocidad percentil 85			69

ANEXO 2

Tabla elementos de diseño para curvas horizontales y velocidades de diseño, peralte máximo 8% de la Dirección General de Caminos de Guatemala.



REPÚBLICA DE GUATEMALA
DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS

DEPARTAMENTO TÉCNICO DE INGENIERÍA

PERALTES, LONGITUDES DE ESPIRALES, SOBRE ANCHOS, CORRIMIENTOS MAX, DELTAS MINIMOS Y DB PARA DISEÑO.

REVISADO POR: Ing. Francisco Guevara & Arq. Dick Valdez

G	20 K.P.H.			30 K.P.H.			40 K.P.H.			50 K.P.H.			60 K.P.H.			70 K.P.H.			80 K.P.H.			90 K.P.H.			DB-42			DB-46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	Radio	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin	e%	LS	SA	Cr. Max.	Dmin																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1	114.52	3.00	13	0.00	0.01	9538m	3.00	17	0.00	0.02	1765m	3.00	23	0.00	0.03	1524m	3.00	29	0.00	0.04	1358m	3.00	35	0.00	0.05	1200m	3.00	41	0.00	0.07	1075m	3.00	47	0.00	0.09	960m	3.00	53	0.00	0.11	855m	3.00	59	0.00	0.14	760m	3.00	65	0.00	0.18	675m	3.00	71	0.00	0.23	600m	3.00	77	0.00	0.29	535m	3.00	83	0.00	0.36	480m	3.00	89	0.00	0.44	435m	3.00	95	0.00	0.53	400m	3.00	101	0.00	0.64	375m	3.00	107	0.00	0.77	350m	3.00	113	0.00	0.91	325m	3.00	119	0.00	1.07	300m	3.00	125	0.00	1.24	275m	3.00	131	0.00	1.43	250m	3.00	137	0.00	1.63	225m	3.00	143	0.00	1.84	200m	3.00	149	0.00	2.07	175m	3.00	155	0.00	2.31	150m	3.00	161	0.00	2.57	125m	3.00	167	0.00	2.84	100m	3.00	173	0.00	3.12	75m	3.00	179	0.00	3.41	50m	3.00	185	0.00	3.71	25m	3.00	191	0.00	4.02	0m	3.00	197	0.00	4.34	0m	3.00	203	0.00	4.67	0m	3.00	209	0.00	5.01	0m	3.00	215	0.00	5.36	0m	3.00	221	0.00	5.71	0m	3.00	227	0.00	6.07	0m	3.00	233	0.00	6.44	0m	3.00	239	0.00	6.81	0m	3.00	245	0.00	7.19	0m	3.00	251	0.00	7.57	0m	3.00	257	0.00	7.96	0m	3.00	263	0.00	8.35	0m	3.00	269	0.00	8.74	0m	3.00	275	0.00	9.14	0m	3.00	281	0.00	9.54	0m	3.00	287	0.00	9.94	0m	3.00	293	0.00	10.35	0m	3.00	299	0.00	10.76	0m	3.00	305	0.00	11.17	0m	3.00	311	0.00	11.58	0m	3.00	317	0.00	12.00	0m	3.00	323	0.00	12.42	0m	3.00	329	0.00	12.84	0m	3.00	335	0.00	13.26	0m	3.00	341	0.00	13.69	0m	3.00	347	0.00	14.12	0m	3.00	353	0.00	14.55	0m	3.00	359	0.00	14.98	0m	3.00	365	0.00	15.42	0m	3.00	371	0.00	15.86	0m	3.00	377	0.00	16.30	0m	3.00	383	0.00	16.74	0m	3.00	389	0.00	17.19	0m	3.00	395	0.00	17.64	0m	3.00	401	0.00	18.09	0m	3.00	407	0.00	18.54	0m	3.00	413	0.00	19.00	0m	3.00	419	0.00	19.46	0m	3.00	425	0.00	19.92	0m	3.00	431	0.00	20.38	0m	3.00	437	0.00	20.85	0m	3.00	443	0.00	21.32	0m	3.00	449	0.00	21.79	0m	3.00	455	0.00	22.26	0m	3.00	461	0.00	22.74	0m	3.00	467	0.00	23.22	0m	3.00	473	0.00	23.70	0m	3.00	479	0.00	24.18	0m	3.00	485	0.00	24.66	0m	3.00	491	0.00	25.15	0m	3.00	497	0.00	25.64	0m	3.00	503	0.00	26.13	0m	3.00	509	0.00	26.62	0m	3.00	515	0.00	27.11	0m	3.00	521	0.00	27.60	0m	3.00	527	0.00	28.10	0m	3.00	533	0.00	28.59	0m	3.00	539	0.00	29.09	0m	3.00	545	0.00	29.59	0m	3.00	551	0.00	30.09	0m	3.00	557	0.00	30.59	0m	3.00	563	0.00	31.09	0m	3.00	569	0.00	31.59	0m	3.00	575	0.00	32.09	0m	3.00	581	0.00	32.59	0m	3.00	587	0.00	33.09	0m	3.00	593	0.00	33.59	0m	3.00	599	0.00	34.09	0m	3.00	605	0.00	34.59	0m	3.00	611	0.00	35.09	0m	3.00	617	0.00	35.59	0m	3.00	623	0.00	36.09	0m	3.00	629	0.00	36.59	0m	3.00	635	0.00	37.09	0m	3.00	641	0.00	37.59	0m	3.00	647	0.00	38.09	0m	3.00	653	0.00	38.59	0m	3.00	659	0.00	39.09	0m	3.00	665	0.00	39.59	0m	3.00	671	0.00	40.09	0m	3.00	677	0.00	40.59	0m	3.00	683	0.00	41.09	0m	3.00	689	0.00	41.59	0m	3.00	695	0.00	42.09	0m	3.00	701	0.00	42.59	0m	3.00	707	0.00	43.09	0m	3.00	713	0.00	43.59	0m	3.00	719	0.00	44.09	0m	3.00	725	0.00	44.59	0m	3.00	731	0.00	45.09	0m	3.00	737	0.00	45.59	0m	3.00	743	0.00	46.09	0m	3.00	749	0.00	46.59	0m	3.00	755	0.00	47.09	0m	3.00	761	0.00	47.59	0m	3.00	767	0.00	48.09	0m	3.00	773	0.00	48.59	0m	3.00	779	0.00	49.09	0m	3.00	785	0.00	49.59	0m	3.00	791	0.00	50.09	0m	3.00	797	0.00	50.59	0m	3.00	803	0.00	51.09	0m	3.00	809	0.00	51.59	0m	3.00	815	0.00	52.09	0m	3.00	821	0.00	52.59	0m	3.00	827	0.00	53.09	0m	3.00	833	0.00	53.59	0m	3.00	839	0.00	54.09	0m	3.00	845	0.00	54.59	0m	3.00	851	0.00	55.09	0m	3.00	857	0.00	55.59	0m	3.00	863	0.00	56.09	0m	3.00	869	0.00	56.59	0m	3.00	875	0.00	57.09	0m	3.00	881	0.00	57.59	0m	3.00	887	0.00	58.09	0m	3.00	893	0.00	58.59	0m	3.00	899	0.00	59.09	0m	3.00	905	0.00	59.59	0m	3.00	911	0.00	60.09	0m	3.00	917	0.00	60.59	0m	3.00	923	0.00	61.09	0m	3.00	929	0.00	61.59	0m	3.00	935	0.00	62.09	0m	3.00	941	0.00	62.59	0m	3.00	947	0.00	63.09	0m	3.00	953	0.00	63.59	0m	3.00	959	0.00	64.09	0m	3.00	965	0.00	64.59	0m	3.00	971	0.00	65.09	0m	3.00	977	0.00	65.59	0m	3.00	983	0.00	66.09	0m	3.00	989	0.00	66.59	0m	3.00	995	0.00	67.09	0m	3.00	1001	0.00	67.59	0m	3.00	1007	0.00	68.09	0m	3.00	1013	0.00	68.59	0m	3.00	1019	0.00	69.09	0m	3.00	1025	0.00	69.59	0m	3.00	1031	0.00	70.09	0m	3.00	1037	0.00	70.59	0m	3.00	1043	0.00	71.09	0m	3.00	1049	0.00	71.59	0m	3.00	1055	0.00	72.09	0m	3.00	1061	0.00	72.59	0m	3.00	1067	0.00	73.09	0m	3.00	1073	0.00	73.59	0m	3.00	1079	0.00	74.09	0m	3.00	1085	0.00	74.59	0m	3.00	1091	0.00	75.09	0m	3.00	1097	0.00	75.59	0m	3.00	1103	0.00	76.09	0m	3.00	1109	0.00	76.59	0m	3.00	1115	0.00	77.09	0m	3.00	1121	0.00	77.59	0m	3.00	1127	0.00	78.09	0m	3.00	1133	0.00	78.59	0m	3.00	1139	0.00	79.09	0m	3.00	1145	0.00	79.59	0m	3.00	1151	0.00	80.09	0m	3.00	1157	0.00	80.59	0m	3.00	1163	0.00	81.09	0m	3.00	1169	0.00	81.59	0m	3.00	1175	0.00	82.09	0m	3.00	1181	0.00	82.59	0m	3.00	1187	0.00	83.09	0m	3.00	1193	0.00	83.59	0m	3.00	1199	0.00	84.09	0m	3.00	1205	0.00	84.59	0m	3.00	1211	0.00	85.09	0m	3.00	1217	0.00	85.59	0m	3.00	1223	0.00	86.09	0m	3.00	1229	0.00	86.59	0m	3.00	1235	0.00	87.09	0m	3.00	1241	0.00	87.59	0m	3.00	1247	0.00	88.09	0m	3.00	1253	0.00	88.59	0m	3.00	1259	0.00	89.09	0m	3.00	1265	0.00	89.59	0m	3.00	1271	0.00	90.09	0m	3.00	1277	0.00	90.59	0m	3.00	1283	0.00	91.09	0m	3.00	1289	0.00	91.59	0m	3.00	1295	0.00	92.09	0m	3.00	1301	0.00	92.59	0m	3.00	1307	0.00	93.09	0m	3.00	1313	0.00	93.59	0m	3.00	1319	0.00	94.09	0m	3.00	1325	0.00	94.59	0m	3.00	1331	0.00	95.09	0m	3.00	1337	0.00	95.59	0m	3.00	1343	0.00	96.09	0m	3.00	1349	0.00	96.59	0m	3.00	1355	0.00	97.09	0m	3.00	1361	0.00	97.59	0m	3.00	1367	0.00	98.09	0m	3.00	1373	0.00	98.59	0m	3.00	1379	0.00	99.09	0m	3.00	1385	0.00	99.59	0m	3.00	1391	0.00	100.09	0m	3.00	1397	0.00	100.59	0m	3.00	1403	0.00	101.09	0m	3.00	1409	0.00	101.59	0m	3.00	1415	0.00	102.09	0m	3.00	1421	0.00	102.59	0m	3.00	1427	0.00	103.09	0m	3.00	1433	0.00	103.59	0m	3.00	1439	0.00	104.09	0m	3.00	1445	0.00	104.59	0m	3.00

ANEXO 3

Características geométricas de los sitios estudiados clasificados por condición, Ruta Centroamérica 14, Ruta Nacional 17.

Condición		1					Condición		2				
G°	R	Def.	e %	Ls	Vd	V85	G°	R	Def.	e%	Ls	Vd	V85
10	114.59	Izq.	10	61	60	79.4	10	114.59	Der.	10	61	60	71.0
15	76.39	Der.	10	56	50	73.0	10	114.59	Izq.	10	61	60	73.1
9	127.32	Der.	9.8	60	60	84.7	10	114.59	Izq.	10	61	60	86.9
13	88.15	Der.	9.8	55	50	71.0	4	286.48	Izq.	9.1	65	80	90.0
10	114.59	Izq.	8.7	49	50	67.0	7	163.70	Der.	8.8	54	60	78.0
19	60.31	Der.	9.5	48	40	65.0	4	286.48	Der.	7.5	49	70	96.0
18	63.66	Izq.	9.3	47	40	56.0	4	286.48	Izq.	7.5	49	70	92.7
20	57.30	Izq.	9.7	49	40	61.0	3	381.97	Der.	5.6	40	70	99.1
22	52.09	Der.	9.9	50	40	62.0	6	190.99	Der.	5.8	32	50	67.3
12	95.49	Izq.	7.1	36	40	63.0	20	57.30	Der.	9.7	49	40	66.0
15	76.39	Der.	8.4	42	40	62.8	15	76.39	Izq.	8.4	42	40	65.0
22	52.09	Der.	9.9	50	40	58.0	4	286.48	Izq.	7.5	49	70	83.9
15	76.39	Izq.	8.4	42	40	59.9	2	572.96	Der.	3.8	39	70	91.1
17	67.41	Der.	9	45	40	61.0	3	381.97	Der.	5.6	40	70	79.0
17	67.41	Der.	9	45	40	62.0	5	229.80	Izq.	8.7	58	70	77.0
15	76.39	Izq.	10	56	50	61.0	10	114.59	Der.	10	61	60	76.0
10	114.59	Der.	6.1	31	40	63.0	10	114.59	Izq.	10	61	60	73.4
7	163.70	Der.	10	67	70	84.0	9	127.32	Der.	9.8	60	60	73.8
7	163.70	Izq.	10	67	70	85.0	10	114.59	Izq.	10	61	60	81.1
7	163.70	Der.	10	67	70	78.0	10	114.59	Izq.	10	61	60	86.0
9	127.32	Der.	9.8	60	60	76.8	5	229.18	Der.	6.8	42	60	81.0
15	76.39	Izq.	10	56	50	56.3	6	190.99	Der.	9.7	64	70	75.6
5	229.18	Izq.	8.7	58	70	84.4	2	572.86	Izq.	3.8	39	70	94.0
							2	572.86	Izq.	3.8	39	70	92.9
							4	286.48	Der.	7.5	49	70	95.0
							4	286.48	Izq.	5.5	35	60	83.0
							4	286.48	Der.	7.5	49	70	83.0
							5	229.18	Izq.	8.7	58	70	74.0
							4	286.48	Izq.	7.5	49	70	69.3

Condición		3					Condición		4				
G°	R	Def.	e%	Ls	Vd	V85	G°	R	Def.	e%	Ls	Vd	V85
5	229.80	Izq.	8.7	58	70	79.0	7	163.70	Der.	10	67	70	77.0
10	114.59	Der.	10	61	60	75.0	7	163.70	Izq.	10	67	70	81.0
10	114.59	Izq.	10	61	60	74.3	7	163.70	Der.	10	67	70	73.7
9	127.32	Der.	9.8	60	60	78.0	9	127.32	Der.	9.8	60	60	76.5
10	114.59	Izq.	10	61	60	78.8	15	76.39	Izq.	10	56	50	59.6
10	114.59	Izq.	10	61	60	85.4	5	229.18	Izq.	8.7	58	70	74.8
5	229.18	Der.	6.8	42	60	79.3	10	114.59	Izq.	10	61	60	80.0
6	190.99	Der.	9.7	64	70	70.0	15	76.39	Der.	10	56	50	69.0
2	572.86	Izq.	3.8	39	70	93.2	9	127.32	Der.	9.8	60	60	66.7
2	572.86	Izq.	3.8	39	70	97.3	13	88.15	Der.	9.8	55	50	67.3
4	286.48	Der.	7.5	49	70	84.0	10	114.59	Izq.	8.7	49	50	64.6
4	286.48	Izq.	5.5	35	60	86.0	19	60.31	Der.	9.5	48	40	59.4
4	286.48	Der.	7.5	49	70	85.1	18	63.66	Izq.	9.3	47	40	62.1
5	229.18	Izq.	8.7	58	70	71.4	20	57.30	Izq.	9.7	49	40	55.0
4	286.48	izq.	7.5	49	70	72.4	22	52.09	Der.	9.9	50	40	60.0
10	114.59	Der.	10	61	60	73.0	12	95.49	Izq.	7.1	36	40	60.9
10	114.59	Izq.	10	61	60	72.0	15	76.39	Der.	8.4	42	40	67.0
10	114.59	Izq.	10	61	60	95.2	22	52.09	Der.	9.9	50	40	58.0
4	286.48	Izq.	9.1	65	80	90.8	15	76.39	Izq.	8.4	42	40	60.0
7	163.70	Der.	8.8	54	60	82.7	17	67.41	Der.	9	45	45	60.0
4	286.48	Der.	7.5	49	70	93.1	17	67.41	Der.	9	45	40	56.0
4	286.48	Izq.	7.5	49	70	97.4	15	76.39	Izq.	10	56	50	60.0
3	381.97	Der.	5.6	40	70	105.2	10	114.59	Der.	6.1	31	40	52.5
6	190.99	Der.	5.8	32	50	64.9							
20	57.30	Der	9.7	49	40	59.0							
15	76.39	Izq.	8.4	42	40	63.0							
4	286.48	Izq.	7.5	49	70	86.0							
2	572.96	Der.	3.8	39	70	95.4							
3	381.97	Der.	5.6	40	70	67.0							

Condición		5					Condición		6				
G°	R	Def.	e%	Ls	Vd	V85	G°	R	Def.	e%	Ls	Vd	V85
10	114.59	Der.	10	61	60	70.6	8	143.24	Izq.	9.4	58	60	60.1
10	114.59	Izq.	10	61	60	70.6	10	114.59	Der.	10	61	60	69.0
9	127.32	Der.	9.8	60	60	74.4	15	76.39	Izq.	10	56	50	68.0
10	114.59	Izq.	10	61	60	76.0	10	114.59	Izq.	10	61	60	64.0
15	76.39	Der.	10	56	50	63.0	15	76.39	Der.	10	56	50	79.0
8	143.24	Der.	9.4	58	60	77.0	10	114.59	Der.	10	61	60	71.0
15	76.39	Izq.	10	56	50	78.0	5	229.18	Der.	9.9	71	80	79.3
3	381.97	Izq.	7.3	53	80	93.1	6	190.99	Der.	9.7	64	70	72.6
10	114.59	Izq.	10	61	60	82.5	5	229.18	Izq.	8.7	58	70	86.9
10	114.59	Der.	10	61	60	81.3	5	229.18	Der.	8.7	58	70	79.4
5	229.18	Der.	6.8	42	60	89.6	6	190.99	Der.	9.7	64	70	80.0
5	229.18	Izq.	8.7	58	70	93.4	3	381.97	Der.	5.6	40	70	92.0
15	76.39	Izq.	10	56	50	70.6	11	104.17	Izq.	6.6	33	40	63.9
4	286.48	Der.	7.5	49	70	84.0	7	163.70	Der.	10	67	70	72.3
4	286.48	Izq.	7.5	49	70	90.9	7	163.70	Izq.	10	67	70	65.0
15	76.39	Izq.	10	56	50	67.0	8	143.24	Izq.	9.4	58	60	69.0
10	114.59	Der.	10	61	60	72.0	10	114.59	Der.	10	61	60	75.0
10	114.59	Izq.	10	61	60	74.0	15	76.39	Izq.	10	56	50	66.0
9	127.32	Der.	9.8	60	60	75.2	10	114.59	Izq.	10	61	60	72.3
10	114.59	Izq.	10	61	60	81.0	15	76.39	Der.	10	56	50	69.1
15	76.39	Der.	10	56	50	62.5	10	114.59	Der.	10	61	60	62.0
8	143.24	Der.	9.4	58	60	86.1	5	229.18	Der.	9.9	71	80	88.3
15	76.39	Izq.	10	56	50	68.4	6	190.99	Der.	9.7	64	70	71.9
3	381.97	Izq.	7.3	53	80	94.2	5	229.18	Izq.	8.7	58	70	98.0
10	114.59	Izq.	10	61	60	85.2	5	229.18	Der.	8.7	58	70	94.0
10	114.59	Der.	10	61	60	92.4	6	190.99	Der.	9.7	64	70	84.0
5	229.18	Der.	6.8	42	60	94.6	3	381.97	Der.	5.6	40	70	100.6
5	229.18	Izq.	8.7	58	70	88.0	11	104.17	Izq.	6.6	33	40	65.0
15	76.39	Izq.	10	56	50	73.0	7	163.70	Der.	10	67	70	66.0
4	286.48	Der.	7.5	49	70	88.1	7	163.70	Izq.	10	67	70	73.8
4	286.48	Izq.	7.5	49	70	94.0							
15	76.39	Izq.	10	56	50	67.0							