



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

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO
URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-
CRUCE DE IPALA**

Inga. Anna Lucía García Sagastume

Asesorado por M. Sc. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO
URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-
CRUCE DE IPALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. ANNA LUCÍA GARCÍA SAGASTUME
ASESORADO POR MSC. ING. EDSON TONIÑO HERNÁNDEZ MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN GEOMÁTICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
DIRECTORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO
URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-
CRUCE DE IPALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 10 de octubre 2022.



Inga. Anna Lucía García Sagastume

LNG.DECANATO.OI.112.2024



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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-CRUCE DE IPALA**, presentado por: **Inga. Anna Lucía García Sagastume**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

Guatemala, febrero de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, febrero de 2024

LNG.EEP.OI.112.2024

En mi calidad de 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 del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-CRUCÉ DE IPALA”

presentado por **Inga. Anna Lucía García Sagastume** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 7 de octubre de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-CRUCES DE IPALA** del estudiante **Anna Lucia Garcia Sagastume** quien se identifica con número de carné **201603098** del programa de Ingeniería Geomatica.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Marlon Antonio Perez Turk
Coordinador
Ingeniería Geomatica
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 1 2418-8000 Ext. 86226

Guatemala, 24 de marzo de 2022

MSc. Ing. Edgar Dario Alvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de
Postgrados Presente

Distinguido MSc. Ing. Álvarez Cotí:

Por este medio informo a usted, que acepto ser el asesor del curso de seminario dos para el protocolo titulado: "**Influencia de la expansión urbana e instalación de áreas de servicio en la eficiencia del tramo Esquipulas-cruce de Ipala de la carretera CA-10**", de la estudiante Anna Lucía García Sagastume, de la Maestría en Ingeniería Geomática, identificado con numero de carné 3383 30747 2007.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Edson Toniño Hernández Mazariegos
Ingeniero Agrónomo en RNR
Colegiado No. 6354
MSc. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos
Asesor
Escuela de Estudios de Postgrado

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Dina Sagastume y Giovani García, quienes siempre han creído en mis capacidades y talentos.

Mis hermanas

Rocío, Jezabel y Christell García, por estar a mi lado y apoyarme cada día de mi vida.

Mis abuelos

Digna Magdalena Portillo, Oscar García, Dina Cerón y Roberto Sagastume (q. e. p. d.), por llenarme de dulzura y amor con cada una de sus palabras.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> , por enseñarme el valor del conocimiento y darme la oportunidad de ser la profesional que siempre soñé.
Mis amigos de la maestría	Nathalie Duarte, Christian Sagastume, Pedro Bollat y Wilmer Colocho, por su apoyo incondicional durante todo este proceso de formación.
Mis amigos de la vida	Rodrigo Merck, Glenda Borrayo, Edwin López, José Adolfo Aguilar, Gabriel Diaz y Kevin Sánchez. Por continuar acompañándome en el camino de alcanzar mis sueños.
Mi asesor	Ingeniero Edson Toniño, por asesorarme y compartirme sus conocimientos durante este proceso de investigación ayudándome a alcanzar mi sueño.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
ANTECEDENTES.....	XXIII
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXVII
RESUMEN MARCO METODOLÓGICO	XXIX
INTRODUCCIÓN	XXXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Sistema de información geográfica	1
1.2. Teledetección	1
1.2.1. Sensores remotos.....	2
1.2.2. Imagen de satélite	3
1.2.3. Fotografías aéreas.....	3
1.3. Sistema de posicionamiento global	6
1.4. Planificación urbana	7
1.4.1. Sintaxis del espacio	8
1.4.2. Forma de la ciudad	9
1.4.3. Equipamiento urbano.....	9
1.4.4. Áreas de servicio	10

1.4.5.	Movilidad urbana y periurbana	11
1.4.6.	Marco legal sobre la expansión de carreteras.....	11
1.4.6.1.	Ley de Parcelamientos Urbanos	12
1.4.6.2.	Código Municipal.....	12
1.4.6.3.	Ley Preliminar de Urbanismo	14
1.4.6.4.	Ley del Registro de Información Catastral.....	15
1.4.6.5.	Reglamentos Sobre el Derecho de Vía de los Caminos Públicos y su Relación con los Predios que Atraviesan	16
1.4.6.6.	Ley de Vivienda.....	17
1.4.6.7.	Plan Nacional de Desarrollo Katún 2032.....	17
1.4.6.8.	Plan de Desarrollo Vial 2018-2022.....	18
1.5.	Elementos que influyen en la eficiencia de las carreteras.....	19
1.5.1.	Criterios de diseño	19
1.6.	Monografía de la carretera CA-10.....	21
1.6.1.	Centros urbanos que conecta	21
1.6.2.	Uso del suelo.....	22
1.6.3.	Principales actividades productivas.....	22
1.6.4.	Modificaciones y ampliaciones de la vía	22
1.7.	Servicios de monitoreo de tráfico	24
1.7.1.	Google Maps	24
1.7.2.	Waze	25
2.	RESULTADOS.....	27
2.1.	Área de estudio	27
2.2.	Área ocupada por equipamiento urbano	29
2.3.	Tiempo de recorrido por subtramo	47

2.4.	Encuesta a usuarios de la carretera CA-10	53
2.5.	Índice de ocupación de equipamiento urbano	55
3.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	59
3.1.	Variación de área ocupada por equipamiento urbano	59
3.2.	Tiempo de recorrido	64
3.3.	Comparativa de tiempo de viaje con porcentaje de equipamiento urbano por clase	65
3.4.	Encuesta a usuarios	69
3.5.	Índice de ocupación de equipamiento urbano	71
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES.....	77
	REFERENCIAS	79
	APÉNDICES	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de fotografías según el campo angular del lente	4
Figura 2.	Clasificación de fotografías según el eje de la cámara	5
Figura 3.	Geometría básica de la fotografía aérea vertical	6
Figura 4.	Mapa de ubicación del área de estudio	28
Figura 5.	Diagrama de longitud de subtramos con relación al tramo de estudio.....	29
Figura 6.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 1.....	31
Figura 7.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 2.....	32
Figura 8.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 3.....	33
Figura 9.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 4.....	34
Figura 10.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 5.....	35
Figura 11.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 6.....	36
Figura 12.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 7.....	37
Figura 13.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 8.....	38

Figura 14.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 9	39
Figura 15.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 10	40
Figura 16.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 11	41
Figura 17.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 12	42
Figura 18.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 13	43
Figura 19.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 14	44
Figura 20.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 15	45
Figura 21.	Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 16	46
Figura 22.	Mapa de calor del tiempo de recorrido en dirección Esquipulas-Cruce de Ipala.....	47
Figura 23.	Mapa de calor del tiempo de recorrido en dirección Cruce de Ipala-Esquipulas	48
Figura 24.	Tiempo de viaje subtramo 1-4.....	49
Figura 25.	Tiempo de viaje subtramo 5-8.....	50
Figura 26.	Tiempo de viaje subtramo 9-12.....	51
Figura 27.	Tiempo de viaje subtramo 13-16.....	52
Figura 28.	Resultados de la encuesta extendida a usuarios de la carretera CA-10.....	54
Figura 29.	Gráfica de dispersión de tiempo de recorrido contra área ocupada por equipamiento urbano.....	57

TABLAS

Tabla 1.	Área estimada ocupada por clase de equipamiento urbano en 2006 y 2023.....	30
Tabla 2.	Peso ponderado de cada clase de equipamiento urbano	55
Tabla 3.	Área estimada ocupada por clase de equipamiento urbano y tiempo de recorrido	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
R^2	Coeficiente de determinación
ha	Hectárea
km	Kilómetro
%	Porcentaje

GLOSARIO

Áreas de servicio	Zonas colindantes con las carreteras, diseñadas expresamente para albergar instalaciones y servicios destinados a la cobertura de las necesidades de la circulación.
Datos de vehículos en circulación	Técnica de recolección de datos de tráfico que utiliza vehículos equipados con dispositivos de seguimiento GPS para recopilar información sobre la velocidad, la ubicación y otros parámetros de tráfico.
Derecho de vía	Faja de terreno de ancho variable dentro del cual se encuentra comprendida la carretera, sus obras complementarias, servicios, áreas previstas para futuras obras de ensanchamiento, mejoramiento y zonas de seguridad para el usuario.
Equipamiento urbano	Áreas, espacios o edificaciones y elementos de uso público o privado que atiendan las necesidades básicas y colectivas de la comunidad.
Tránsito promedio diario	Cantidad de vehículos que circulan entre dos puntos durante un tiempo de 24 horas.

RESUMEN

El presente estudio analizó geoespacialmente la variación de la eficiencia de las carreteras a través de la relación del incremento de equipamiento urbano y la variación del tiempo de recorrido. Como zona de estudio se seleccionó un tramo de 48.32 kilómetros de la carretera CA-10, los cuales se extienden desde el cruce de Ipala ubicado en el kilómetro 173 hasta el ingreso a la ciudad de Esquipulas en el kilómetro 223 según el kilometraje de la Dirección General de Caminos. La zona de estudio comprende un área de interés (*buffer*) de 50 metros a cada lado desde el eje central de la vía, dicha zona se dividió en subtramos de 3 kilómetros de longitud, generando un total de 16 subtramos en los cuales se estimó el área ocupada por equipamiento urbano y se midió el tiempo de recorrido.

Se ubicó geoespacialmente el equipamiento urbano, utilizando información secundaria: ortofotos del IGN (Instituto Geográfico Nacional) del año 2006 e imágenes satelitales de Google Earth correspondientes al año 2022, y, a partir de trabajo de campo se categorizó en clases cada equipamiento urbano. Para la medición del tiempo de recorrido de los subtramos de estudio se utilizó el servicio de Google Maps, este tiempo se comparó y validó con información obtenida a través de encuestas a usuarios de la carretera. Con la información obtenida se identificaron las clases de equipamiento urbano que tienen mayor influencia en el tiempo de viaje, finalmente se calculó un índice de influencia según la clase de equipamiento urbano.

Los resultados de la investigación indicaron que, en el área de estudio el equipamiento urbano se ha triplicado con relación al año 2006, siendo la clase

predominante la zona residencial, además de acuerdo con los resultados obtenidos por el índice de influencia según clase de equipamiento urbano es esta clase la que influye más en el tiempo de recorrido, seguida de las áreas de servicio y zonas comerciales. En cuanto al tiempo de recorrido se observó que es más tardado viajar desde el cruce de Ipala hacia Esquipulas que en la dirección contraria. Con relación al índice calculado, se obtuvo un coeficiente de diferenciación de 0.53 lo que implica que, si bien el equipamiento urbano influye en el tiempo de viaje, hay otros factores externos que también deben de ser considerados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La eficiencia de la carretera CA-10 ha variado a lo largo de los años, siendo sensible en las variaciones del tiempo de viaje de un punto a otro, lo cual repercute en el incremento de los costos de traslado de personas y mercancías. De acuerdo con Fundesa (2017), la velocidad promedio de viaje en la carretera CA-10 era de 32 kilómetros por hora, lo que representa un decrecimiento del 20 % con relación al 2015, agregado a lo anterior, Peláez (2017) indica que la velocidad mínima para carreteras centroamericanas debería ser 60 kilómetros por hora considerando que son vías rápidas y de gran importancia.

Para el caso específico de la carretera CA-10, se ha generado un incremento significativo de equipamiento urbano en las zonas aledañas a la vía, tales como: gasolineras, restaurantes, comercios, tiendas de conveniencia, entre otros, asimismo, se observa en la carretera múltiples viviendas y residencias en zonas cercanas a centros poblados, esto debido a que como lo indica Banzat (2015), cuando el centro de la ciudad ya no puede absorber el crecimiento poblacional, la expansión explota hacia las periferias, que en este caso son las que están conectadas por las carreteras.

El incremento de la población de las ciudades también ha impactado en el tránsito promedio diario de la carretera CA-10, lo que implica que cada vez se esté más cerca de superar la capacidad de diseño de la carretera.

Un punto importante, es que estas variaciones no son exclusivas de la carretera CA-10, sino que se observan en todas las carreteras de Guatemala; sin embargo, a pesar de ser un problema común a nivel nacional, el abordaje para

su regulación dentro del marco legal es mínimo, puesto que solamente se encuentran lineamientos generales dentro de la legislación guatemalteca, entre ella se puede mencionar: Ley de Parcelamientos Urbanos, Código municipal, Ley Preliminar de Urbanismo y Reglamento sobre el Derecho de Vía de los Caminos Públicos y su Relación con los Predios que Atraviesan.

Por tanto, considerando que la variación de tiempo de recorrido y el incremento de equipamiento urbano son dos fenómenos que actualmente se presentan en las carreteras, es propicio establecer la relación que estos dos elementos guardan, para de así identificar si uno es causante del otro y si en conjunto están afectado la eficiencia de las carreteras, para ello se establece como área de estudio la carretera CA-10 en el tramo Esquipulas-Cruce de Ipala.

Para llevar a cabo este proceso investigativo, se proponen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la relación o grado de influencia entre la instalación de equipamiento urbano en la eficiencia de las carreteras?
- ¿En cuántos minutos se recorre un tramo carretero según la distribución espacial del equipamiento urbano en la zona?
- ¿Cuántas hectáreas cuadradas de las zonas aledañas al tramo Esquipulas-Cruce de Ipala de la CA-10 están ocupados por equipamiento urbano?
- ¿Cuál es la influencia de las diferentes clases de equipamiento urbano en el tiempo de viaje?

JUSTIFICACIÓN

Este trabajo corresponde a la línea de investigación de Sistemas de Información Geográficos (SIG) aplicados al ordenamiento territorial de la maestría en ciencias de la Geomática.

El funcionamiento y eficiencia de las carreteras guatemaltecas, ha variado a lo largo de los años siendo el tiempo de viaje, una de las variaciones más sensibles. De forma paralela a esta variación, se ha incrementado el equipamiento urbano en las zonas aledañas derivado de la expansión urbana, así como también al incremento de zonas comerciales y áreas de servicio.

La realización de esta investigación permitió determinar a través del uso de SIG el impacto que el establecimiento de distintas categorías de equipamiento urbano tiene en el tiempo de desplazamiento de las carreteras.

Se generó el primer mapa predial de equipamiento urbano de carreteras en la región oriente del país mediante el mapeo de imágenes satelitales; se creará una base de datos con el tiempo de recorrido de 48 kilómetros de la carretera CA-10 a partir de la utilización de servicios de interfaz de programación de aplicaciones (APIS) de Google.

Los resultados obtenidos a partir de esta investigación pueden ser utilizados como información científica para la toma de decisiones relacionadas a la planificación urbana y también vial.

OBJETIVOS

General

Determinar la influencia de la instalación de equipamiento urbano en la eficiencia de la carretera CA-10 en el tramo Esquipulas - cruce de Ipala a través del uso de Sistemas de Información Geográfica.

Específicos

1. Caracterizar y clasificar el equipamiento urbano ubicado a la orilla del tramo Esquipulas- cruce de Ipala de la carretera CA-10.
2. Determinar el tiempo de viaje de los usuarios a lo largo del tramo Esquipulas- cruce de Ipala de la carretera CA-10.
3. Establecer una relación geoespacial entre el tiempo de viaje y clase de equipamiento urbano ubicado en carretera el tramo Esquipulas- cruce de Ipala de la carretera CA-10.

HIPÓTESIS

La eficiencia de carreteras ha variado siendo sensible a través del incremento del tiempo de recorrido. A su vez, en las zonas aledañas a la vía se observa mayor cantidad de equipamiento urbano. Este fenómeno es perceptible en las diferentes carreteras de Guatemala, incluyendo la CA-10.

Tomando en cuenta estos factores se tiene la hipótesis que la cantidad y clase de equipamiento urbano ubicado en una carretera influyen en el tiempo de recorrido y en consecuencia en la eficiencia de esta.

ANTECEDENTES

Banzat (2015) identificó 3 patrones de expansión urbana: (1) pueblos aislados en la periferia, (2) pueblos en proceso de absorción, (3) lotificaciones. Cada uno de estos patrones, especialmente los últimos 2 tienen una dependencia funcional y económica con la ciudad, debido a que los pobladores deben acudir a adquirir servicios, a estudiar o trabajar, esta dependencia, provoca un aumento en el tránsito vehicular y al ser las carreteras las únicas vías de comunicación se fomenta el congestionamiento vial, empieza a surgir comercio informal sobre la ruta, lo cual contribuye al surgimiento de más centros poblados. Este elemento es importante, tomando en cuenta que permite entender una de las razones por las cuales se da la expansión urbana.

Asimismo, Dmuchowsky y Velázquez (2016) evaluaron el nivel de accesibilidad de transporte en las periferias del área metropolitana de Buenos Aires. En esta investigación se hizo alusión de lo compleja que es la red de transporte debido a que, entre otras cosas, hay viviendas a las que se accede desde la carretera. Este estudio utilizó la encuesta de movilidad domiciliaria del año 2009 y la investigación de transporte urbano de Buenos Aires realizada durante 2006 y 2007; estos datos se agruparon para elaborar una tasa de generación de viajes la cual se utilizó con fines comparativos. Al igual que el estudio de Banzat, esta investigación demuestra la importancia que tiene la planificación urbana en las zonas periféricas.

Por otra parte, Navaro y Herrera (2013), realizaron un estudio en dos autopistas interurbanas de Chile con el fin de determinar tiempos de demora. Los datos de tiempo de viaje se recolectaron midiendo los tiempos de viaje real cada

15 minutos a través de Waze. A partir de los datos obtenidos se construyeron curvas acumuladas, o diagramas de entrada y salida, al inicio y final de las vías de interés, con los cuales se determinaron tiempos de demora, así como también el número de vehículos afectados por la presencia de la congestión vial.

En el caso de Escobar y Urazán (2014) desarrollaron un instrumento de planificación urbana y regional. Para ello instalaron equipos GPS (Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés) en diferentes medios de transporte con dos objetivos: 1) almacenar datos y 2) entender la operatividad del medio de transporte. Para el análisis de los datos obtenidos, se generaron curvas isócronas de accesibilidad integral según el tiempo y tipo de vehículo; con ello fue posible hacer matrices de comparación de viaje y obtener las curvas gradientes de accesibilidad de cada posible origen.

En esta investigación también se abordaron análisis de costos mediante la utilización de matriz de costos de transporte del INVIAS (Instituto Nacional de Vías) y la matriz de costo del CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas). La metodología permite establecer con claridad en qué áreas de un territorio específico se deben aunar esfuerzos para ofrecer una mejor accesibilidad y aumentar la calidad de vida de los pobladores, todo esto relacionado con los diferentes usos del suelo y nodos de actividad presentes en un área determinada.

Montoya (2014), por su parte realizó un modelo logístico para transporte de carga terrestre en cinco corredores viales en la ciudad de Medellín. Se analizó el tiempo de recorrido y distancia, información que luego se analizó a través del software Promodel. El tiempo se obtuvo utilizando el servicio de Google Maps. Los datos obtenidos se utilizaron para hacer una simulación y comparar la cantidad de veces que se podía recorrer cada uno de los corredores durante 60 días.

Del mismo modo, Liberali (2016), en su estudio sobre las distancias geográficas de las capitales argentinas para el transporte de pasajeros, midió a partir de Google Maps el kilometraje y el tiempo de viaje en automóvil y autobús desde Buenos Aires a diferentes ciudades Argentinas. El tiempo de viaje también se midió para transporte aéreo. Este estudio se basó en la macrocefalia urbana que hay en Buenos Aires, situación que también ocurre en Guatemala. La razón por la cual fue importante medir los tiempos de viaje sobre el kilometraje es debido a las variaciones climáticas, topográficas y estados de las carreteras.

Con relación a la movilidad, Morales et al. (2019) desarrollaron indicadores de accesibilidad con el propósito de descubrir si guardan relación con el valor de la tierra residencial en la ciudad de Guatemala. Para ello desarrollaron un modelo de regresión multivariante considerando las siguientes métricas: índices de acceso geográfico, los cuales están basados en el tiempo por modo de transporte; métricas de acceso geográfico estimadas a través de la sintaxis espacial en varias escalas espaciales y una métrica geométrica propuesta según el acceso geográfico calculado a través del acceso geográfico.

Se observaron 1026 espacios de uso residencial y parcelas entre 100 y 1000 m². Se utilizaron hexágonos de 300 m de diámetro, superficie que permitió una resolución adecuada. En estos hexágonos se agregó la información de acceso geográfico por modo de transporte, así como también otras variables adicionales. Se tomó en cuenta la cercanía a tiendas de conveniencia, bancos, escuelas, áreas recreativas, de cultura; fue importante el tiempo de llegada y la cercanía.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Esta investigación tuvo un carácter correlacional debido a que tiene como objetivo identificar la relación o grado de influencia que tiene la instalación de equipamiento urbano en las carreteras con el tiempo de recorrido de estas.

El tramo de estudio tiene una longitud de 48 kilómetros, los cuales están comprendidos entre la ciudad de Esquipulas (km 223) y la bifurcación Ipala-Chiquimula (km 173).

El área de estudio comprendió 4.83 kilómetros cuadrados que corresponden a un área de interés de 50 metros a cada lado desde el eje central de la carretera, esta área se definió luego de diferentes pruebas realizadas y tomando en cuenta que la distancia restringida para construir en zonas aledañas a la carretera de acuerdo con el código municipal son 40 metros.

Los resultados obtenidos podrán utilizarse por desarrolladores de proyectos, planificadores urbanos y entidades de gobierno, para el desarrollo de políticas públicas, leyes y normas que regulen el surgimiento de equipamiento urbano en las carreteras del país.

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se describe de forma breve la metodología utilizada para desarrollar los objetivos de la presente investigación.

El marco metodológico está constituido de cuatro fases: dentro de la primera, se incluye la recopilación de información secundaria y recursos geoespaciales (ortofotos, archivos vectoriales de carreteras y kilometrajes); en la segunda fase, se incluye la obtención de tiempo de viaje a través del servicios de interfaz de programación de aplicaciones, direcciones de Google Maps, la digitalización de predios sobre ortofotos o imágenes satelitales y el diseño de herramientas para el levantamiento de información: ficha de campo y encuesta; la tercera fase, consiste en el levantamiento de datos de campo, con el objetivo de clasificar equipamiento urbano de acuerdo con las clases establecidas, así como la realización de encuestas a los usuarios de la carretera y finalmente, la última fase consiste en analizar los datos obtenidos.

La primera fase, consiste en la recopilación de información secundaria sobre el derecho de vía y distancia mínima para construir carreteras en Guatemala, países latinoamericanos y España (ver apéndice 1). Con la información recopilada se propusieron tres áreas de interés: 20 metros desde el eje central de la carretera, 50 y 100. Al evaluar las propuestas, se determinó que la más adecuada es de 50 metros debido a que abarca las construcciones a las que se accede directamente desde la carretera. Asimismo, se buscó información para definir las clases de equipamiento urbano tomando en cuenta los servicios y productos que se ofrecen en la carretera CA-10 (ver Apéndice 2).

Esta fase, también incluyó la recopilación de información geoespacial, para ello se consultó desde la escala municipal hasta la nacional; las municipalidades que se encuentran dentro del área de estudio no cuentan con información digitalizada ni actualizada, lo cual impidió su uso para el presente estudio.

Seguidamente se revisó el registro catastral del Registro de Información Catastral (RIC), se encontró que para el área de estudio hay dos municipios dentro del registro: San Jacinto que ya está catastrado y Quezaltepeque que está en proceso catastral; sin embargo, tras consultar la documentación correspondiente, se determinó que la competencia del RIC se limita a registrar los límites topográficos de los predios, sin contemplar la existencia de construcciones ni el uso de estos; por tanto, la información del RIC, no fue útil para esta investigación.

A continuación, se consultó al IGN, del cual se obtuvieron ortofotos del territorio nacional a través de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Segeplan; en este mismo sitio se descargó el archivo vectorial de carreteras. Cabe destacar que las únicas ortofotos oficiales son del año 2006, por tanto, se usaron de referencia y de comparación con recursos actuales.

Se analizó el uso de imágenes de satélite de acceso libre; sin embargo, la mayoría de ellas presentaron una escala espacial de mediana resolución, lo cual representa un límite para la interpretación de predios, por tanto, se optó por utilizar imágenes de Google Earth con fecha diciembre de 2022. Para el caso del kilometraje, se utilizó el mapa oficial de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

Una vez delimitado el área de estudio, se inició la segunda fase. El primer paso fue la digitalización de las edificaciones, para ello se utilizaron de base las ortofotos y las imágenes satelitales de Google Earth. Debido a que ambos recursos son imágenes ópticas la digitalización de las construcciones se realizó de forma manual a través del software ArcGIS Pro.

Para el caso de la toma de tiempo, se evaluó el funcionamiento de los servicios de Waze y Google Maps. A través de la realización de pruebas en los servicios, se identificó que la longitud mínima que permite detectar cambios en el tiempo de recorrido para el tramo de interés es de 3 kilómetros; por tanto, a través de ArcGIS Pro se crearon subtramos de 3 kilómetros de longitud del área de interés, dando un total de 16. A estos subtramos se les aplicó un área de interés (*buffer*) de 50 m a cada lado tomando en cuenta las pruebas realizadas en la fase uno.

Luego de comparar los datos de Waze y Google Maps, se seleccionó Google Maps como servicio de consulta para la recolección de tiempos de viaje. Para llevarlo a cabo, se registró en un archivo XML, el tiempo de recorrido indicado por Google Maps para cada subtramo en lapsos de 60 minutos durante dos semanas de marzo de 2023. Cabe destacar que esto se hizo para ambas direcciones.

Dentro de esta fase también se incluye el diseño y creación de una ficha de campo para el levantamiento de información, para ello se utilizó el servicio Survey123 de ArcGIS. Esta ficha de campo se diseñó para recopilar información sobre la ubicación, clase y subdivisión del equipamiento urbano (ver Apéndice 3).

Asimismo, se creó una encuesta para usuarios de la carretera, la cual permitió recopilar información sobre tiempo de recorrido promedio en el tramo de

estudio, así también la identificación de las zonas que representan mayor retraso en el tiempo de viaje. Se utilizó una muestra para poblaciones finitas la cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2} \quad (E. 1)$$

Donde:

- n = tamaño de la muestra.
- Z = valor de la distribución normal estándar correspondiente al nivel de confianza deseado (se recomienda un nivel de confianza del 95 %, por lo que $Z = 1.96$ para una distribución normal).
- p = proporción estimada de la población que tiene la característica de interés.
- $q = 1 - p$.
- e = margen de error (se recomienda 0.05).

Para calcular la proporción se tomó en cuenta la población del departamento de Chiquimula de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística (2018) (447,544) y el parque vehicular en el departamento de Chiquimula (99,626), ambos datos corresponden al año 2021 debido a que ese es el dato más reciente de parque vehicular en Chiquimula brindado por el Observatorio Nacional de Seguridad de Tránsito (ONSET). La proporción se calculó a través de la ecuación 2:

$$p = \frac{n_v}{p_d} \quad (E. 2)$$

Donde:

- n_v = número de vehículos registrados en el departamento.
- p_d = población departamental.

La muestra obtenida fue de 171 personas. Para realizar la encuesta se utilizó un formulario digital de Google (ver Apéndice 4), el cual se divulgó través de redes sociales en grupos locales y también se hizo trabajo de campo en la ciudad de Esquipulas para realizarle esta encuesta a personas particulares que viajen o hayan viajado de forma frecuente de Esquipulas a Chiquimula o viceversa, se incluyen conductores de buses extraurbanos, trabajadores y particulares.

La tercera fase, corresponde al trabajo de campo. Para llevarla a cabo se utilizó el mapa predial 2023 y la ficha de campo realizada en Survey 123 trabajados en las fases anteriores. Se hizo un recorrido por todo el tramo de estudio, llenando una encuesta por cada edificación o conjunto de edificaciones. Una vez finalizado este proceso, la información recopilada se incorporó a la tabla de atributos de los polígonos digitalizados en la primera fase tanto para el mapa del año 2023 como para el 2006; para este último se asignó la misma clase a las edificaciones que se identificaron en el año 2023 y que ya se encontraban asentadas en el año 2006.

En la cuarta fase, se incluye el análisis de datos. El primer paso fue calcular el área total por clase de equipamiento urbano en los 48 kilómetros y en los subtramos definidos, con esta información se calculó la porción de área ocupada por cada clase de equipamiento urbano con relación al área total para cada caso. Esta información se utilizó para crear el mapa de equipamiento urbano para 2006 y 2023.

Seguidamente se calculó el tiempo promedio de viaje para cada subtramo en las diferentes horas del día, de esta forma fue posible identificar las horas de mayor demanda. Con esta información se crearon los mapas de calor de tiempos de viaje. Seguidamente se calculó el tiempo promedio de recorrido de cada subtramo, el cual fue utilizado para realizar un mapa que indica el tiempo de recorrido que sigue la simbología: rojo para tiempos altos, naranja tiempo medio y amarillo tiempo normal o bajo.

Con la información anterior se realizó el análisis multicriterio en su forma de rateo, para ello se calculó el aporte de cada clase según el área ocupada y el tiempo de recorrido por subtramo (ecuación 3), a continuación, se calculó el peso ponderado de cada clase (ecuación 4):

$$AC_i = \sum_{j=1}^n \frac{A_{ij}}{A_{tj}} * t_j \quad (E. 3)$$

Donde:

- AC_i = aporte de la clase. i
- A_{ij} = área ocupada por la clase i en el tramo. j
- A_{tj} = área total del tramo j.
- t_j = tiempo necesario para recorrer el tramo. j
- n = número total de tramos.
- j = índice de cada tramo desde 1 hasta n.

$$PP_{clase_i} = \frac{AC_i}{\sum_{k=1}^m AC_k} * 100 \quad (E. 4)$$

Donde:

- PP_{clasei} = peso ponderado de la clase i.
- AC_i = aporte de la clase i.
- AC_k = aporte de la clase k.
- m = número total de clases.
- k = índice de cada clase desde 1 hasta m .

Con el peso ponderado por clase se calculó el índice de influencia según clase de equipamiento urbano, para ello se utilizó la ecuación 5.

$$i_j = \sum_{j=1}^k \frac{A_{ij}}{A_{tj}} * PP_{clasei} \quad (E. 5)$$

Donde:

- I_j = Índice del tramo j.
- A_{ij} = área ocupada por la clase i en el tramo j.
- A_{tj} = área total del tramo j.
- PP_{clasej} = peso ponderado de la clase i.
- k = número total de clases.
- j = índice de cada clase desde 1 hasta k.

Una vez calculado el índice se procedió a evaluarlo tomando en cuenta el área ocupada por equipamiento urbano y el tiempo de viaje, se clasificó en alto, medio y bajo según la correlación de las dos variables, esta categorización se hizo a través de los percentiles 50 y 70. Como paso siguiente se calculó la ecuación lineal del modelo y se calculó el coeficiente de diferenciación.

Finalmente se elaboró el análisis de resultados y se redactó el informe final.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Rozas y Sánchez (2004), la provisión de infraestructura eficiente es fundamental para el desarrollo económico y social de un país. En los últimos años la eficiencia de carreteras ha variado siendo sensible a través del incremento del tiempo de recorrido. A su vez, en las zonas aledañas a la vía se observa mayor cantidad de equipamiento urbano. Ante este contexto surge la necesidad de determinar si los dos fenómenos descritos guardan una causalidad o relación entre sí.

Para abordar esta problemática, se propuso estudiar 48.3 kilómetros de la carretera CA-10 partiendo desde el cruce de Ipala ubicado en el kilómetro 173 hasta el ingreso a la ciudad de Esquipulas en el kilómetro 223. Es importante mencionar que la carretera CA-10 es una vía importante pues permite la conexión de los departamentos del nororiente guatemalteco: Zacapa y Chiquimula, agregado a lo anterior proporciona acceso directo a 39 centros poblados y conecta indirectamente a otros municipios, aldeas y fronteras internacionales tanto con Honduras como con El Salvador.

El área de estudio parte de un área de interés (*buffer*) de 50 metros desde el eje central de la vía, lo que constituye 483 ha. Esta área de estudio se dividió en subtramos de 3 kilómetros de longitud, se obtuvieron 16 subtramos en los cuales se midió el tiempo de recorrido y el porcentaje de ocupación por clase de equipamiento urbano.

La metodología de este trabajo consta de cuatro fases, la primera incluye la recolección de información secundaria y recursos geoespaciales, así como

también la definición del área de estudio y subtramos; la segunda, corresponde a la obtención de tiempos de viaje a través del servicio de Google Maps, la digitalización de equipamiento urbano usando ortofotos 2006 del IGN e imágenes satelitales de Google Earth del año 2022 así como también el diseño de herramientas para el levantamiento de información; la tercera fase, consiste en el trabajo de campo para clasificar el equipamiento urbano ubicado en el área de estudio y la realización de encuestas a usuarios de la carretera; finalmente, la fase 4, consiste en el análisis y correlación de datos obtenidos. En este análisis se incluye la definición de un índice de influencia según clase de equipamiento urbano.

En resumen, esta investigación permitió determinar si la instalación de equipamiento urbano influye en la eficiencia de la carretera CA-10; con los resultados obtenidos, se generó información valiosa para la toma de decisiones en materia de planificación y gestión de carreteras en Guatemala.

1. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se definen los conceptos necesarios para desarrollar la presente investigación.

1.1. Sistema de información geográfica

Los SIG, según Peña 2006 (como se cita en Pérez, 2011), son la unión de la información y de las herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con objetivos concretos, al incluir el término geográfico se está asumiendo que la información trae inmersa la posición en el espacio. Esta es una de las tantas definiciones, pues considerando que los SIG están conformados por diversos componentes y funciones es difícil enmarcarlo en una sola definición.

Los SIG, han modificado la forma de elaboración de mapas y el análisis de la información espacial, por tal motivo han cobrado importancia en distintos sectores de la actualidad. Zhu et al. (2020), indican que los SIG pueden ser clasificados en dos tipos: 1) para propósitos generales en plataformas de cálculo geoespacial como ArcGis, Q-GIS y SuperMap y 2) bajo el uso de herramientas para geo-cálculo especializados, dentro de las que se incluye LandSerf, TauDEM y SoLIM.

1.2. Teledetección

Chuvieco (1995), define a la teledetección como la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos sobre la tierra. Dentro de un sistema de teledetección debe haber tres elementos: sensor, objeto observado y

flujo energético, este último es el que permite establecer una relación entre el sensor y el objeto observado.

El flujo de energía puede darse de la siguiente forma por reflexión, por emisión o por emisión-reflexión, estas son las formas de adquirir información a través de un sensor remoto. La forma más importante de flujo de energía en la teledetección es la reflexión, esto debido a que esta forma se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía del planeta Tierra. El sensor capta este flujo de energía reflejado y es esta la información que transmite a las estaciones receptoras (Chuvienco, 1995).

1.2.1. Sensores remotos

Un elemento fundamental en la teledetección son los sensores. Sobrino (2000), indica que los sensores convierten la señal electromagnética en un formato analógico (fotografía) o digital (imagen), para tal propósito, los sensores se ubican en plataformas fijas o móviles: mástiles, grúas, aviones o satélites.

Sobrino (2000) indica que los sensores pueden ser clasificados en métodos pasivos y activos; los primeros se basan en la detección de las características radiactivas o reflectantes de un sistema observado, ejemplo de ello son las cámaras de fotos sin *flash*, los radiómetros o bien los sistemas de vídeo. Por su parte, los sistemas activos, son los sistemas en los que el sensor cumple doble función: producir una señal (onda electromagnética) y captar la señal producida ejemplo de ello son las cámaras con *flash*, el radar y el sistema lidar.

1.2.2. Imagen de satélite

Tal como lo expresa Sobrino (2000), una imagen satelital es la conversión digital de la señal electromagnética recibida. Entre las plataformas de teledetección espacial puede mencionarse: Landsat, SPOT, NOAA, Sentinel. Las imágenes obtenidas por estos satélites se almacenan en sitios como el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) o bien Copernicus.

1.2.3. Fotografías aéreas

Se define como una imagen o conjunto de imágenes de superficie terrestre adquiridas a través de cámaras fotográficas montadas sobre una plataforma aérea (aeroplano, ultraligero, papalote, o globo aerostático), (Ramírez, 2013).

De acuerdo con Ramírez (2013), la fotografía aérea ofrece como ventajas la facilidad en el reconocimiento del terreno, la extracción y análisis de información contenida en las fotografías y la generación de cartografía de gran escala.

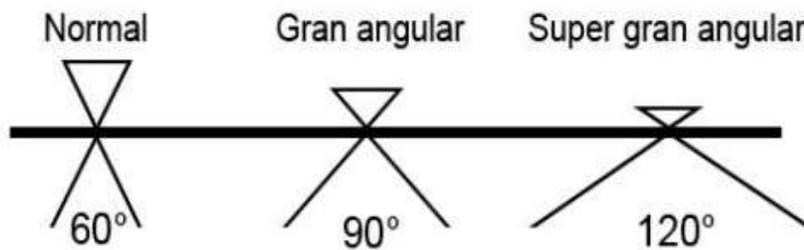
Las fotografías aéreas se pueden clasificar de acuerdo con lo siguiente:

- Campo angular de la lente: puede ser lente normal, grandes angulares y súper grandes angulares, los ángulos respectivos de observación son 60, 90 y 120° (ver figura 1).
- Inclinación del eje óptico de la lente respecto a la vertical: esta categoría permite subdividir en fotografía vertical, oblicua (baja y alta). La primera hace referencia a la fotografía en la que el eje óptico de la cámara coincide con la vertical hacia el terreno; la segunda, según el ángulo con la vertical:

si varía de 10 a 20° se denomina oblicua baja, si el ángulo es mayor se denomina alta o panorámica puesto que forma un ángulo tal que permite fotografiar la línea del horizonte (ver figura 2).

Figura 1.

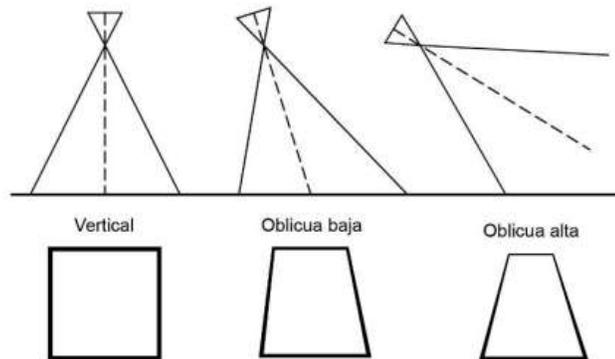
Clasificación de fotografías según el campo angular del lente



Nota. Campo angular de un lente para toma de fotografías aéreas. Obtenido de Héctor Ramírez (2013). *Restitución fotogramétrica a partir de fotografía aérea de pequeño formato* (<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/417/1/232761.pdf>), consultado el 10 de mayo de 2022. De dominio público.

Figura 2.

Clasificación de fotografías según el eje de la cámara

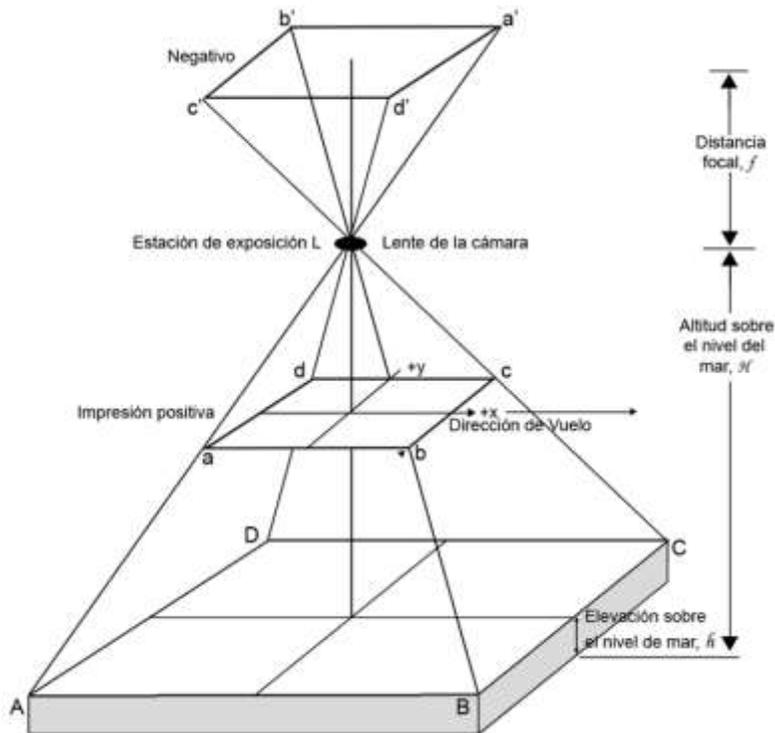


Nota. Clasificación de fotografías según el eje de la cámara. Obtenido de Héctor Ramírez (2013). *Restitución fotogramétrica a partir de fotografía aérea de pequeño formato* (<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/417/1/232761.pdf>), consultado el 10 de mayo de 2022. De dominio público.

De acuerdo con Ramírez (2013), si bien las fotos oblicuas son más fáciles de interpretar tomando en cuenta que se está más familiarizado con las vistas oblicuas o laterales de los objetos, estas contienen un alto grado de distorsión en la geometría de la escena, distorsión que no sucede en las fotografías verticales, por tanto, son las fotografías verticales ideales si el propósito es la medición y mapeo.

En la figura 3 se ilustra la geometría básica y los parámetros implicados en una fotografía aérea vertical. La distancia focal define la geometría de los rayos de luz que generan la imagen del terreno en el plano focal de la cámara (Ramírez, 2013).

Figura 3.
Geometría básica de la fotografía aérea vertical



Nota. Geometría básica de la fotografía aérea vertical. Obtenido de Héctor Ramírez. *Restitución fotogramétrica a partir de fotografía aérea de pequeño formato* (<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/417/1/232761.pdf>), consultado el 10 de mayo de 2022. De dominio público.

1.3. Sistema de posicionamiento global

El GPS, fue el primero de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), pertenece al gobierno estadounidense sus fines fueron inicialmente militares; sin embargo, posteriormente se liberó para uso civil, pasando a formar parte de innovaciones tecnológicas militares que fueron transferidas al mundo civil (Etxebarria, 2001).

Sistema GPS cuenta con 31 satélites de órbita terrestre media (MEO, por sus siglas en inglés) orbitando la tierra; cabe destacar que requiere de 24 satélites para tener una cobertura global, pero con los otros 7 se garantiza repuestos por si alguno de los 24 satélites falla.

1.4. Planificación urbana

De acuerdo con Ornés (2009), la planificación urbana “Es un proceso de descripción, análisis y evaluación de las condiciones de funcionamiento de las ciudades para poder generar propuestas de diseño y formular proyectos que permitan regular la dinámica urbana y ambiental de toda la ciudad” (p. 42).

La planificación urbana es base para que una ciudad funcione de forma eficiente y cumpla las necesidades de sus ciudadanos; sin embargo, un aspecto importante que se debe tomar en cuenta es que la planificación urbana es versátil y evoluciona a lo largo del tiempo, Ornés (2009) explica que esto se debe a que las prioridades y objetivos de la ciudad se modifican a partir de los distintos momentos históricos de la misma, como por ejemplo: la industrialización, la densificación, expansión de actividades, turismo, entre otras; por tanto, la labor de planificación es una actividad que debe hacerse regularmente en una ciudad.

Para el caso guatemalteco se cuenta con entidades que velan por la planificación urbana entre los cuales se puede mencionar: El Gobierno Central, la Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (Segeplan) y el Consejo de Desarrollo Urbano y Rural (Conadur); además existen otros órganos que apoyan al cumplimiento de la planificación urbana, por ejemplo: el Consejo Nacional para la Vivienda (Conavi).

A continuación, se abordan algunos elementos importantes en tema de planificación urbana, asimismo se desarrolla los instrumentos y leyes guatemaltecas que promueven la planificación urbana en el país.

1.4.1. Sintaxis del espacio

De acuerdo con Hillier (2007) (como se cita en Tagliari, 2017) la teoría de sintaxis espacial se basa en concebir el espacio como función social, en el cual se define un sistema de barreras que regula el desplazamiento y la co-presencia humana en base a patrones sociales del comportamiento.

Esta teoría permite representar el espacio mediante grafos y analizarlo a partir de conceptos y herramientas simples a través de las cuales se explican propiedades como: conectividad, integración, elección e inteligibilidad (Ornés, 2009). Estos conceptos se profundizan a continuación:

- **Conectividad:** mide la cantidad de nodos que están conectados de forma directa a un nodo de origen.
- **Integración:** mide la distancia topológica de un nodo de origen a todos los otros de un sistema. Los espacios muy integrados se representan en la gama de los rojos, degradando hacia el violeta.
- **Elección:** mide el flujo de movimientos a través de la red urbana a partir de evaluar los trayectos más cortos desde todos los orígenes a todos los destinos y el menor cambio angular. Este elemento sirve para conocer el potencial movimiento de peatones y vehículos.

- Inteligibilidad: es el coeficiente de correlación entre conectividad e integración. Determina la capacidad para comprender la estructura global de la red desde una posición global.

1.4.2. Forma de la ciudad

Álvarez (2017) lo define como “Expresión física del espacio construido de las ciudades, cuyo perfil se puede representar en planta u horizontal, de manera vertical o en contorno” (p. 159). Este concepto es importante debido a que permite analizar el crecimiento de la mancha urbana a lo largo de los años.

Para el análisis de la forma urbana, se utiliza el índice de alargamiento. Para calcularlo, Bastié y Dézert (1980) y Knox (1987) (como se cita en Álvarez, 2017), propusieron dos métodos: el primero se hace mediante la división de la distancia más larga de la mancha urbana entre la distancia más corta; el segundo resulta de la división de la superficie del círculo máximo circunscrito en la mancha urbana dividido dentro de la superficie total de ella.

1.4.3. Equipamiento urbano

De acuerdo con el Centro de Estudios Territoriales y la Municipalidad de Guarne (2014), el equipamiento urbano se define como “Las áreas, espacios o edificaciones y elementos de uso público o privado (...) que atiendan las necesidades básicas y colectivas de la comunidad” (p. 61).

Tomando en cuenta estos lineamientos, el equipamiento urbano corresponde a todas las construcciones públicas o privadas que proporcionen un servicio a la comunidad.

Para clasificar el equipamiento urbano, el centro de estudios Territoriales y la Municipalidad de Guarne (2014), propone tres categorías generales:

- Equipamiento colectivo: dentro de esta categoría se incluyen las edificaciones que están al servicio de la comunidad, dentro de ellas está el equipamiento educativo, cultural, de salud, de bienestar social y de culto.
- Equipamiento de servicios urbanos básicos: dentro de esta categoría se incluyen las edificaciones que suplen las necesidades básicas de la población, dentro de este equipamiento se incluye: servicios de seguridad ciudadana, abastecimiento de alimentos, cementerios y servicios ciudadanos, servicios públicos y transporte incluyendo terminales y depósitos de rutas de transporte.
- Equipamientos deportivos y recreativos: incluye las edificaciones destinadas a la recreación pasiva, activa o mixta, puede ser de tipo privada o pública.

1.4.4. Áreas de servicio

Este concepto es utilizado sobre todo en Europa. El Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente (1994), define a las áreas de servicio de la siguiente forma:

Zonas colindantes con las carreteras, diseñadas expresamente para albergar instalaciones y servicios destinados a la cobertura de las necesidades de la circulación, pudiendo incluir estaciones de suministro

de carburantes, hoteles, restaurantes, talleres de reparación y otros servicios análogos destinados a facilitar la seguridad y comodidad de los usuarios de la carretera. (p. 11)

Considerando la definición, las áreas de servicio de una carretera son importantes debido a que facilitan el acceso a productos y servicios de primera necesidad para los usuarios de las vías carreteras.

1.4.5. Movilidad urbana y periurbana

Suárez, et al. (2016) resaltan la importancia del transporte urbano en la vertebración económica y social de las ciudades, así como también de los núcleos poblacionales. Los esfuerzos en los últimos años se han enfocado en ampliar avenidas y calles con el objetivo de mejorar la movilidad urbana.

Un punto importante, señalado por Banzat (2015) es la expansión urbana la cual ocurre cuando el núcleo de la ciudad ya no puede absorber el crecimiento explota hacia las periferias y al darse esta expansión no necesariamente se garantiza el acceso a todos los servicios por lo que se crea una dependencia funcional y económica por esta razón los residentes de las periferias deben trasladarse a la ciudad generando movimientos pendulares que contribuyen al surgimiento de tránsito vehicular en la zona.

1.4.6. Marco legal sobre la expansión de carreteras

En Guatemala existen 5 principales instrumentos legales que abordan el tema de la expansión urbana en carreteras, Ley de Parcelamientos Urbanos, Código Municipal, Ley Preliminar de Urbanismo, el Reglamento Sobre el Derecho

de Vía de los Caminos Públicos y su Relación con los Predios que Atraviesan y la Ley de Vivienda; además, también se cuenta con Plan Nacional de Desarrollo Katún 2032. Agregado a los instrumentos anteriores, en el 2019 el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda publicó el documento Reformulación y Actualización del Plan de Desarrollo Vial 2018-2032, en el cual se analiza el funcionamiento actual de las carreteras y se hacen propuestas para mejorarlo. A continuación, se describe cada uno de los instrumentos mencionados:

1.4.6.1. Ley de Parcelamientos Urbanos

En esta ley se establece que un parcelamiento urbano es la división de una o varias fincas, con el fin de formar otras áreas menores. Esta definición es importante en el contexto de la presente investigación debido a que la existencia de carreteras motiva el asentamiento de lotificaciones y urbanizaciones en la periferia de la ciudad.

La ley en cuestión establece requisitos indispensables como garantizar que el parcelamiento tenga acceso a energía eléctrica, agua potable y vías de acceso. Agregado a ello, se establece que el ente encargado de aprobar un parcelamiento es la municipalidad a cuya jurisdicción corresponda el inmueble. En otras palabras, los parcelamientos, proyectos urbanísticos que se construyan sobre rutas carreteras deben ser aprobados por la municipalidad que tenga jurisdicción en el territorio.

1.4.6.2. Código Municipal

Tal como lo expresa el artículo 1 del Código Municipal el código “Tiene por objeto desarrollar los principios constitucionales referente a la organización,

gobierno, administración y funcionamiento de los municipios” (Contraloría General de Cuentas, 2022, p. 2).

En el capítulo II se aborda todo lo referente al ordenamiento territorial y desarrollo integral, entre los elementos abordados se encuentran lotificaciones, parcelamientos, urbanizaciones y cualquier otra forma de desarrollo urbano o rural. A continuación, se explican más a detalle los artículos que guardan mayor relación con la expansión urbana en las carreteras.

Específicamente en artículo 146 se aborda el tema de autorización para construcciones a la orilla de las carreteras, para lo cual indica que es la municipalidad quien debe dar la autorización estricta, agregado a ello, el permiso no será concedido si la distancia a rostro de la carretera con la edificación es menor a 40 m en carreteras de primera categoría y 25 m en carreteras de segunda categoría. Además, se indica que está prohibido la colocación de establecimientos de bebidas alcohólicas a una distancia menor a 100 m.

En el artículo 147 del Código Municipal se habla de la licencia municipal de autorización, para ello indica que el desarrollador debe garantizar entre otras cosas áreas recreativas y deportivas, mercados, escuelas, terminales de transporte y centros de salud cuando aplique. Esto cobra particular importancia en urbanizaciones periféricas, puesto que como lo establece Banzat (2015) una urbanización que garantice esos servicios representa centros independientes por lo que no fomentan una dependencia económica y funcional tan fuerte con la ciudad como sí lo hacen los polos urbanos.

1.4.6.3. Ley Preliminar de Urbanismo

Esta ley fue desarrollada sentada en la base que las ciudades crecen sin ninguna clase de control en su desplazamiento, cabe destacar que data del año 1956. En su artículo 1 define elementos importantes tales como:

- Área de influencia urbana: área que circula a una ciudad y en la cual se hace sentir los efectos del crecimiento y el desarrollo de sus funciones dentro de un término
- Lotificación: fraccionamiento de terreno en más de cinco lotes con apertura a nuevas calles.
- Plan regulador: conjunto de recomendaciones, formuladas con base en el análisis de las necesidades y recursos de una ciudad, que proporcionan un programa para guiar el desarrollo urbano con el máximo de eficiencia y en la forma más conveniente para la ciudad.
- Sistema vial: red de comunicaciones destinada a canalizar el movimiento de vehículos y peatones.

Un aspecto importante que se menciona en el artículo 3 es que los concejos de las municipalidades de la república serán quienes aprobarán y pondrán en vigor el plan regulador, asimismo serán quienes delimitarán las áreas de influencia de la ciudad, esto con base en la opinión de las dependencias respectivas.

Siguiendo con esta línea, el artículo 7 establece que son las municipalidades quienes deben delimitar el área de influencia de su ciudad,

procurando encerrar a la ciudad o población y los terrenos que la rodean susceptibles de incorporarse a su sector urbano. En estas áreas será necesario ejercer un control urbano.

En el caso de que ocurra conurbación, el artículo 8 indica que estos problemas deberán ser resueltos de común acuerdo entre las municipalidades de las que se trate. Los puntos que no pudieren solucionarse en esta forma serán sometidos por las municipalidades interesadas a conocimientos del Ministerio de Gobernación para que dicte resolución definitiva, previo dictamen de la Dirección General de Obras Públicas.

En el artículo 9 se establece que se debe implantar un plan regulador adecuado que contemple lo siguiente en las áreas de influencia urbana:

- Sistema vial
- Servicios públicos
- Sistemas de tránsito y transportación
- Sistema recreativo y de espacios abiertos
- Edificios públicos y servicios comunales
- Zonas comerciales
- Zonas industriales
- Zonas de servidumbre de reserva
- Cualquier otro aspecto que sea conveniente determinar

1.4.6.4. Ley del Registro de Información Catastral

Esta es la ley que regula el registro catastral realizado por el RIC. A través del catastro se busca identificar los límites de los predios, es por ello por lo que

dentro de sus fichas se incluye planos topográficos, coordenadas de los vértices, acta de verificación de mojones y linderos.

Dentro de sus objetivos no está la captura de información sobre el uso que se le da al predio y tampoco información sobre si hay construcciones; sin embargo, para efectos de esta investigación esta ley define términos importantes dentro del artículo 23:

- Finca: denominación que el Registro de la Propiedad da a un inmueble para su identificación.
- Predio: es el polígono que sirve de unidad territorial del proceso catastral, que se identifica con un código catastral.

1.4.6.5. Reglamentos Sobre el Derecho de Vía de los Caminos Públicos y su Relación con los Predios que Atraviesan

Este reglamento data de 1942, previo a que iniciara el auge de las carreteras en el país (Peláez, 2019). El artículo 2 define al derecho de vía como el derecho que tiene el Estado o las Municipalidades, según el caso, sobre la faja de terreno en que se constituyen los caminos. El artículo 3 define las siguientes distancias según la clasificación de la carretera:

- Carreteras nacionales: 12.50 metros de cada lado.
- Carreteras departamentales: 10 metros de cada lado.
- Carreteras municipales: 7.50 metros de cada lado.
- Caminos de herradura y vecinales: 3 metros de cada lado.

1.4.6.6. Ley de Vivienda

Dentro de esta ley se aborda la creación del Conavi el cual es una instancia y asesor del ente rector, teniendo como funciones ser un órgano deliberativo, consultivo y asesor, con la responsabilidad de proponer, concertar y dar seguimiento a las políticas, estrategias y planes en los desarrollos habitacionales, así como también su ordenamiento territorial, de sus servicios y equipamiento.

La ley tiene relevancia considerando que establece que es el Estado quien debe garantizar la vivienda digna para la población, además de ello establece lineamientos para los desarrolladores habitacionales. Es importante mencionar que, en los últimos años, las zonas aledañas a la ciudad comunicadas por las carreteras han sido ocupadas por zonas residenciales.

Por tanto, esta ley también influye en las nuevas urbanizaciones y asentamientos urbanos que están surgiendo en las afueras de las ciudades y a la orilla de las carreteras.

1.4.6.7. Plan Nacional de Desarrollo Katún 2032

Este plan fue publicado en 2012, contiene múltiples lineamientos con los que pretende relacionar la democracia, el desarrollo y los derechos humanos para que de esta manera se puedan lograr transformaciones sociales y económicas permitiendo el fortalecimiento del Estado.

Dentro de sus ejes prioritarios, el número uno es: Guatemala urbana y rural, en este eje se plantea el establecimiento de un modelo de gestión territorial que articula, en términos ambientales, económicos, socioculturales y políticos, la

sostenibilidad del sistema urbano nacional y las áreas rurales de forma ordenada y equilibrada.

Si bien en las prioridades se hace énfasis a las ciudades y comunidades sostenibles, el ordenamiento territorial y el buen funcionamiento de las ciudades está implícito y es por ello por lo que se menciona este documento.

1.4.6.8. Plan de Desarrollo Vial 2018-2022

Este documento constituye la actualización del Plan de Desarrollo Vial 2008-2017, dentro de sus objetivos están: mejorar la accesibilidad global de las carreteras, modernizar y adaptar las carreteras a condiciones de seguridad y funcionalidad, consolidar las políticas de mantenimiento y conservación de la red vial, modernizar la gestión de la red vial (Pronacom et al., 2018).

Para llevar a cabo este documento, se hizo un inventario de la infraestructura de la carretera actual, tomando en cuenta factores como: número de carriles, ancho y longitud del tramo, entre otros. Para realizar los análisis respectivos el estudio tomó en cuenta factores externos a la infraestructura vial, tales como: turismo, tráfico promedio diario, seguridad vial, condición del asfalto, entre otros.

Dentro del documento se indica que la carretera CA-10 representa un tramo de desarrollo económico y una vía de interés turístico debido a que conduce a la ciudad de Esquipulas que es conocida como la Capital Centroamericana de la Fe y que año con año recibe miles de turistas y peregrinos (Pronacom et al., 2018).

Con relación al tráfico promedio diario anual (TPDA), la carretera CA-10 para el año 2023 presenta, entre la ciudad de Esquipulas a Padre Miguel, un TPDA inferior a cinco mil vehículos diarios, mientras que de Padre Miguel a Chiquimula presenta un TPDA entre cinco mil a 10 mil vehículos diarios.

Este plan también analiza las vías tomando en cuenta el tipo de terreno (llano, ondulado o montañoso), nivel de servicio, velocidad de diseño, pendiente, número de carril, ancho de carril, TPDA, derecho de vía y tipo de superficie; sin embargo, no toma en cuenta aspectos del entorno tales como el equipamiento urbano.

1.5. Elementos que influyen en la eficiencia de las carreteras

En este apartado se abordan los elementos que modifican el funcionamiento de una carretera y por ende su eficiencia:

1.5.1. Criterios de diseño

Estos aspectos son importantes al momento de diseñar una carretera, el manual centroamericano de normas para el diseño geométrico de carreteras toma en cuenta los siguientes criterios: características del tránsito en donde se incluye el volumen, tránsito promedio diario, tránsito en hora pico, composición del tránsito; la capacidad de carreteras que toma en cuenta aspectos como niveles de servicio, capacidad (SIECA, et al., 2011).

A continuación, se detallan los criterios que se consideran más importantes para esta investigación:

- Velocidad de diseño: el diseño de las autopistas actuales enfoca el objetivo de permitir a los conductores operar a altas velocidades con comodidad y seguridad. De acuerdo con Peláez (2017), las carreteras centroamericanas fueron diseñadas con una velocidad de diseño de al menos 60 kilómetros por hora, esto considerando que son vías rápidas.
- Volumen: los volúmenes de tránsito indican la necesidad de mejorar las características geométricas del diseño tales como: número de carriles, anchos, alineamientos y pendientes; así también para establecer cargas para el diseño geométrico de la carretera (SIECA et al., 2011). Para medir estos volúmenes se hacen aforos volumétricos, los cuales permiten medir el tránsito promedio diario, anual, el tránsito por hora pico, así como también la distribución del tránsito hacia otras vías de transporte.
- Capacidad de carreteras: de acuerdo con SIECA et al. (2011) en la ecuación oferta-demanda de una carretera, el volumen de diseño está ubicado en el lado de la demanda y hace referencia al volumen de tránsito horario proyectado para utilizar dicha carretera en el año de diseño, cabe destacar que la proyección se hace normalmente para 20 años; por otra parte, la oferta es medida según la capacidad de la carretera, es decir el número máximo de vehículos que pueden circular en un tramo dado durante un periodo de tiempo específico y bajo las condiciones prevalecientes de la carretera y tránsito vehicular.
- Condición de la carretera: esto hace referencia a al estado de la superficie de la carretera. Para medir este criterio se utiliza el PCI (índice de la condición del pavimento).

1.6. Monografía de la carretera CA-10

La carretera CA-10 conecta la carretera CA-9 a la altura de Río Hondo Zacapa con la frontera Aguas Calientes en Esquipulas, tiene un total de 96 kilómetros, cruza 2 departamentos, 7 municipios y 39 centros poblados.

La carretera es de concreto asfáltico, tiene señalización horizontal y vertical, contiene drenajes en toda su longitud; en el tramo Río Hondo Zacapa a Padre Miguel tiene dos carriles, mientras que en el tramo Padre Miguel a Esquipulas tiene tres, siendo el tercero un carril para rebasar.

De acuerdo con el inventario realizado en la actualización del Plan de Desarrollo Vial, la carretera se encuentra en buen estado, con un índice de condición del pavimento superior a 65 puntos (Pronacom, et al. 2018); sin embargo, hay dos puntos críticos que afectan la movilidad: kilómetro 217 donde, en 2022, se dio un hundimiento de grandes dimensiones que requirió trabajos importantes de reparación y el kilómetro 185 que es también un hundimiento menor que de momento únicamente requiere que los usuarios bajen la velocidad.

1.6.1. Centros urbanos que conecta

La carretera CA-10 pasa por 39 centros urbanos, según el Instituto Nacional de Estadística (2018), los cuales corresponden a cabeceras departamentales, municipales, aldeas, finca y caseríos. Agregado a lo anterior, la carretera CA-10 está conectada con otras carreteras y caminos que comunican a otros municipios, aldeas e incluso a fronteras como lo es la frontera de Anguiatú, con El Salvador y la Frontera el Florido con Honduras.

1.6.2. Uso del suelo

Chiquimula y Zacapa, departamentos donde se ubica la carretera CA-10, están ubicados dentro de lo que se denomina el corredor seco, lo cual impacta directamente en las actividades productivas y uso del suelo.

1.6.3. Principales actividades productivas

Los municipios cruzados por la carretera CA-10 se caracterizan por actividades productivas relacionadas con la agricultura y la ganadería. A la altura de Zacapa se observan siembras de melón y sandía en las zonas aledañas a la carretera. En las partes más montañosas de Chiquimula, la carretera CA-10 conecta con caminos que dirigen a siembras de café y banano; así también a la orilla de la CA-10 se observan múltiples predios ganaderos.

1.6.4. Modificaciones y ampliaciones de la vía

Entre las variaciones que se hicieron en la vía en los últimos años se puede mencionar: la incorporación de un carril para rebasar en el tramo Esquipulas-Padre Miguel; la incorporación de túmulos a la altura de la cabecera municipal de Quezaltepeque; la construcción de las intersecciones para ingresar a la ciudad de Chiquimula; los túmulos y reductores de velocidad a la altura del ingreso de la ciudad de Zacapa.

Estas modificaciones se han debido al incremento del tránsito vehicular, incluyendo el transporte pesado, así también al aumento de equipamiento urbano en la carretera CA-10.

Por otra parte, en el año 2022 la carretera CA-10 se vio fuertemente afectada por desastres naturales. En febrero se identificó una fisura en el puente Petapilla (Barreno 2022), ubicado en el kilómetro 165, por lo que se habilitó un paso alternativo mientras duraba la reparación; sin embargo, en mayo debido a la crecida del río, este puente colapso dejando inhabilitado el paso entre Zacapa y Chiquimula por varias semanas (Barrientos, 2022). Pese a las reparaciones, esta vía alterna volvió a colapsar en junio, dejando la ruta nuevamente inhabilitada.

Agregado a lo anterior, hay dos zonas de riesgo por hundimiento, el primero ubicado en el kilómetro 217 y el segundo en el kilómetro 185. Estos puntos representan un riesgo constante para los usuarios de la carretera, así como también son zonas donde se debe bajar la velocidad y en ciertas ocasiones hay retenes por reparaciones.

El hundimiento del km 217 se agudizó en 2021, debido a que se generaron fisuras que de acuerdo con Conred propician la filtración de agua y tierra suelta (Camacho, 2021). Posterior a ello se iniciaron trabajos de reparación que implicaron el cierre de carriles, complicando el paso por la zona.

Por otra parte, a inicios del año 2023 se inauguró un puesto de control de la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT) en el kilómetro 176.8 de la CA-10, que tiene como objetivo la interceptación, identificación y decomiso de mercancías y medios de transporte que ingresen al territorio nacional para evadir los controles correspondientes. Este puesto obliga a los vehículos que trasladan mercadería a detenerse para hacer revisiones correspondientes.

Agregado a lo anterior, derivado que la CA-10 está dentro de la ruta migrante, se han instalado diferentes puntos policiales de registro, que obligan a buses extraurbanos a detenerse para identificar que todos los pasajeros lleven

su papelería en orden. Esto únicamente ocurre en dirección Esquipulas a ciudad capital.

1.7. Servicios de monitoreo de tráfico

Este tipo de servicio se caracteriza por utilizar datos en tiempo real para proporcionar información sobre tráfico y rutas alternativas en función de las condiciones actuales del tránsito vial. Hay diferentes servicios tales como: Waze, Google Maps, TomTom Go Navigation, MapQuest, Bing Maps. En Guatemala los que mayor presencia tienen son Waze y Google Maps, por tanto, a continuación, se define su funcionamiento.

1.7.1. Google Maps

Esta aplicación permite a las personas navegar y encontrar la ruta más conveniente para llegar a un destino (Mehta et al. 2019). Dentro de sus características se incluye la opción de Street view que permite visualizar a través de fotografías panorámicas partes de ciudades o lugares; los ubicados lugares de interés tales como: hospitales, negocios comerciales, lugares turísticos, entre otros; permite visualizar el tiempo de recorrido de un punto a otro; así también, le permite al usuario ver las rutas a seguir según medio de transporte: automóvil, a pie o en autobús.

De acuerdo con Mehta et al. (2019), actualmente Google Maps proporciona los tiempos estimados de llegada siguiendo dos criterios: el primero utilizando el criterio de la ruta más corta y el segundo tomando en cuenta las condiciones actuales del tráfico. Para calcular el segundo criterio, Karagulian et al. (2021) indica que utiliza los datos de vehículos en circulación (FCD por sus

siglas en inglés) lo cual permite recopilar datos sobre el tráfico a través de smartphones con GPS.

Agregado a lo anterior, Mehta et al. (2019) explica que dentro de los algoritmos de Google Maps se toma en cuenta aspectos como: límite de velocidad de la carretera, velocidad recomendada, histórico de tiempos de desplazamiento, así como también datos en tiempo real.

1.7.2. Waze

Waze es una aplicación de navegación colaborativa creada en 2009, actualmente cuenta con una comunidad de más de 140 millones de personas que incluye editores de mapas, beta testers, traductores, socios, usuarios y carpoolers (Waze, 2023).

Con relación a su funcionamiento, Sánchez, et al. (2021) indican que Waze recopila datos de tráfico de dos maneras:

- **Alertas:** cada usuario de Waze autoinforma las alertas que notó en la carretera. Una vez que se informa una alerta, otros usuarios la validan informando en la aplicación móvil si la alerta aún está presente. En base a la información recibida por los usuarios, Waze calcula un factor de confiabilidad entre 1 y 10, siendo 10 el más confiable. Las alertas pueden ser de tres tipos: (1) accidentes, que representan colisiones de todo tipo; (2) peligro, esta alerta permite reportar vehículos u objetos varados en la vía, condiciones climáticas adversas, inundaciones, entre otros; (3) vía cerrada, esta alerta permite reportar el cierre de una vía por manifestaciones, eventos, mantenimiento y otros.

- Atascos: Waze utiliza FCD obtenidos de teléfonos inteligentes del conductor o del pasajero para generar información del tráfico en tiempo real similar a Google Maps (Hossain, 2018). Cuando la API identifica un grupo significativo de vehículos circulando a una velocidad irregular en contraste con la velocidad de flujo libre, lo clasifica como un atasco. Para cada atasco, Waze recopila información sobre la velocidad promedio, la demora esperada para cruzar la calle en comparación con las condiciones de flujo libre, las coordenadas geográficas y la duración del atasco. La información sobre el estado de las carreteras se actualiza cada 2 min.

2. RESULTADOS

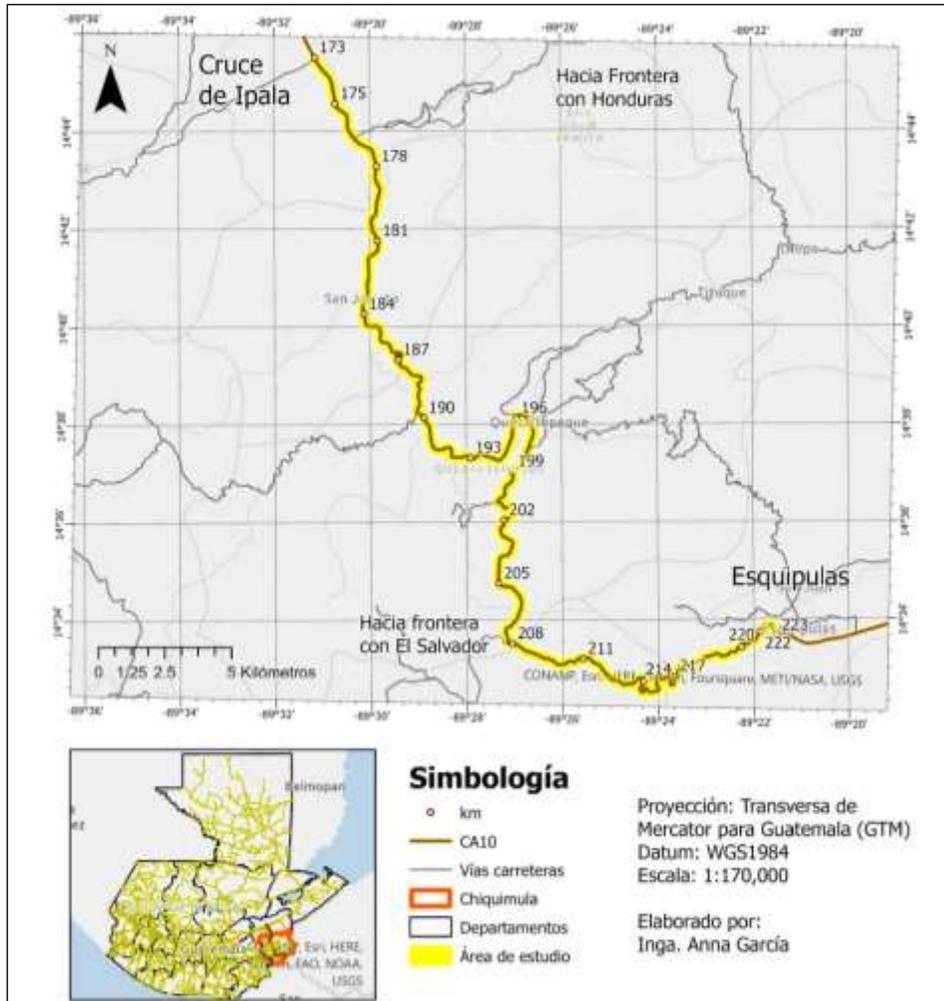
Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la consulta de información secundaria, visitas de campo y análisis.

2.1. Área de estudio

En función de la bibliografía consultada se definió como área de estudio 50 metros a cada lado desde el eje central de la carretera, dando como resultado un área de estudio de 483 hectáreas. Es importante mencionar que el tramo de estudio abarca desde el kilómetro 223 ubicado a la entrada de Esquipulas y el kilómetro 173 ubicado en la bifurcación hacia el municipio de Ipala (Dirección General de Caminos, 2022). Dentro del tramo hay 7 puentes, dos zonas con túmulos, dos zonas con fallas geológicas (hundimientos) y dos conexiones hacia fronteras internacionales.

Figura 4.

Mapa de ubicación del área de estudio



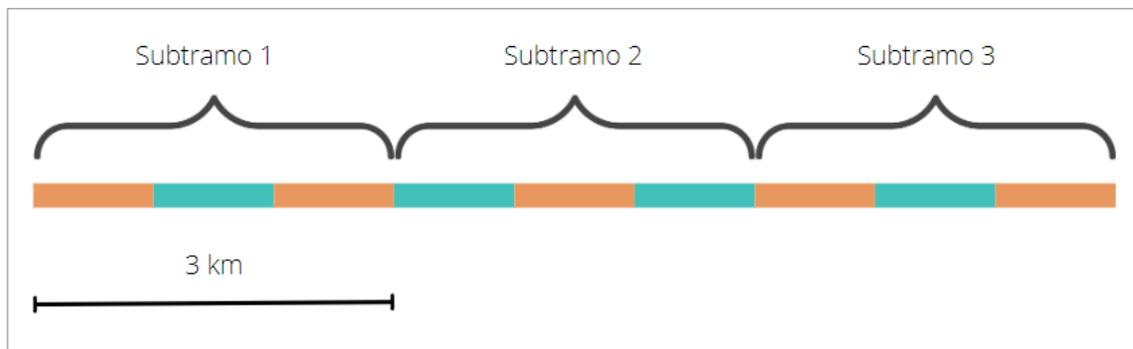
Nota. Ubicación del área de estudio en el territorio guatemalteco. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0.

El tramo de estudio tiene una longitud de 48.32 kilómetros. Para hacer el análisis se crearon 16 subtramos de estudios los cuales tienen una longitud de 3 kilómetros, con excepción del subtramo 16, que tiene una longitud de 3.32

kilómetros. La figura 5 muestra un diagrama que indica la forma de división de los subtramos.

Figura 5.

Diagrama de longitud de subtramos con relación al tramo de estudio



Nota. Ubicación del área de estudio en el territorio guatemalteco. Elaboración propia, realizado con Canva.

2.2. Área ocupada por equipamiento urbano

A partir de la digitalización de las ortofotos del año 2006 del IGN, se obtuvo que para el año 2006, 22.44 hectáreas estaban ocupadas por equipamiento urbano, lo que representaba un 4.65 % del área de estudio. Las clases con mayor ocupación en ese año eran: zona residencial, área de servicio y la clase finca o industria, con 11.98 ha, 2.49 ha y 2.21 ha respectivamente.

Para el año 2023, con base en las imágenes ópticas del servicio de Google Earth, se obtuvo que el área total ocupada por equipamiento urbano es de 71.59 hectáreas, lo que representa un 14.80 % del área de estudio y es tres veces mayor que el área estimada para el año 2006. Las clases con mayor ocupación son: zona residencial, área de servicio y finca o industria, al igual que en 2006;

sin embargo, ahora las áreas ocupadas ahora son: 32.98 ha, 8.58 ha y 8.46 ha, respectivamente.

El análisis y comparación de equipamiento urbano se hizo tanto a nivel de tramo como subtramo, los resultados se muestran en la tabla 1 y en las figuras de la 6 a la 21, respectivamente.

Tabla 1.

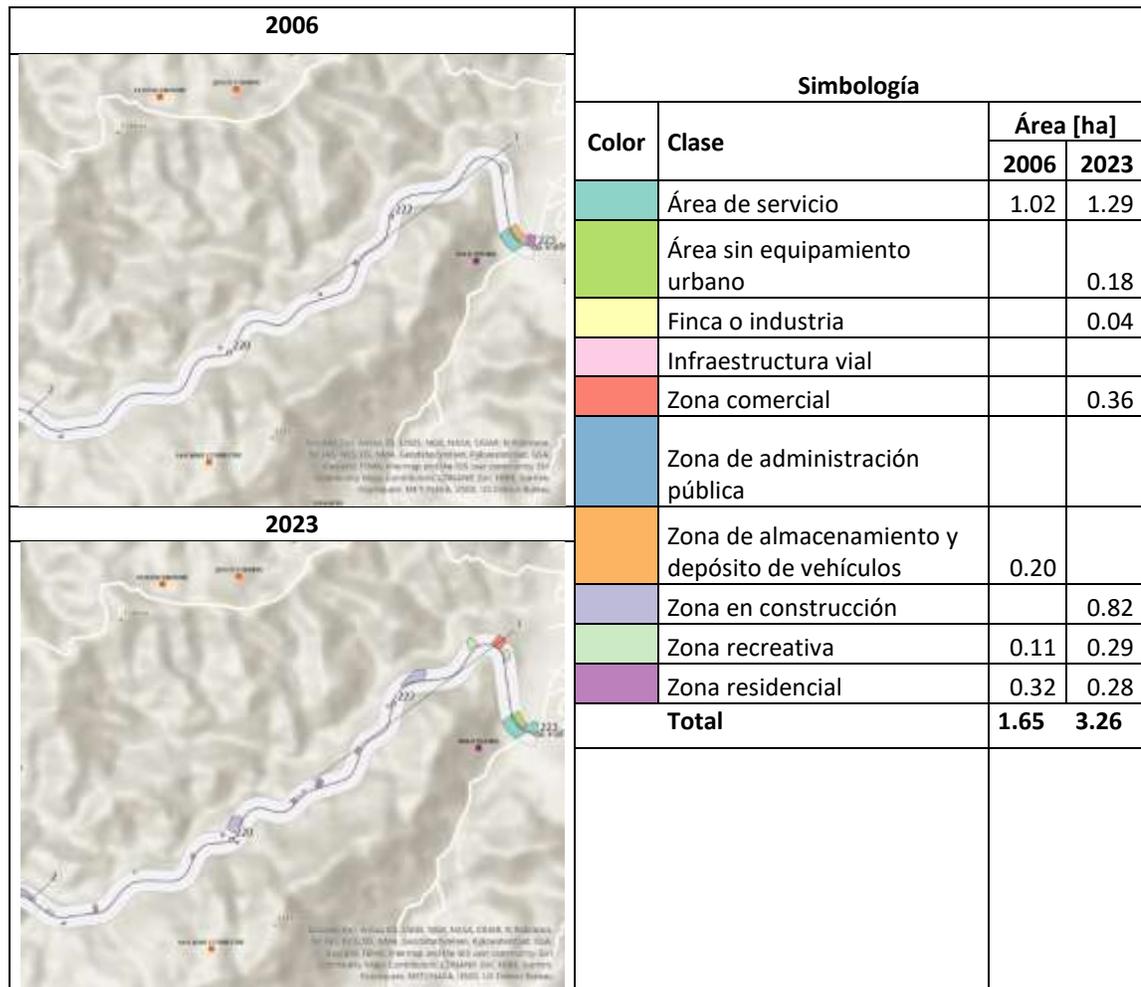
Área estimada ocupada por clase de equipamiento urbano en 2006 y 2023

Clase	Área [ha]		% de incremento
	2006	2023	
Área de servicio	2.49	8.85	^ 255.4
Área sin equipamiento urbano	0.00	0.47	
Finca o industria	2.21	8.46	^ 282.3
Infraestructura vial	0.00	0.02	
Zona comercial	1.83	6.12	^ 234.6
Zona de administración pública	3.06	5.34	^ 117.0
Zona de almacenamiento y depósito de vehículos	0.64	5.21	^ 708.0
Zona en construcción	0.08	3.56	^ 4358.7
Zona recreativa	0.15	0.59	^ 303.3
Zona residencial	11.98	32.98	^ 175.2
Total	22.44	71.59	^ 219.1

Nota. Detalle del área ocupada por clase de equipamiento urbano en el área de estudio en los años 2006 y 2022 y porcentaje de incremento en el área de estudio. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 6.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 1



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 7.

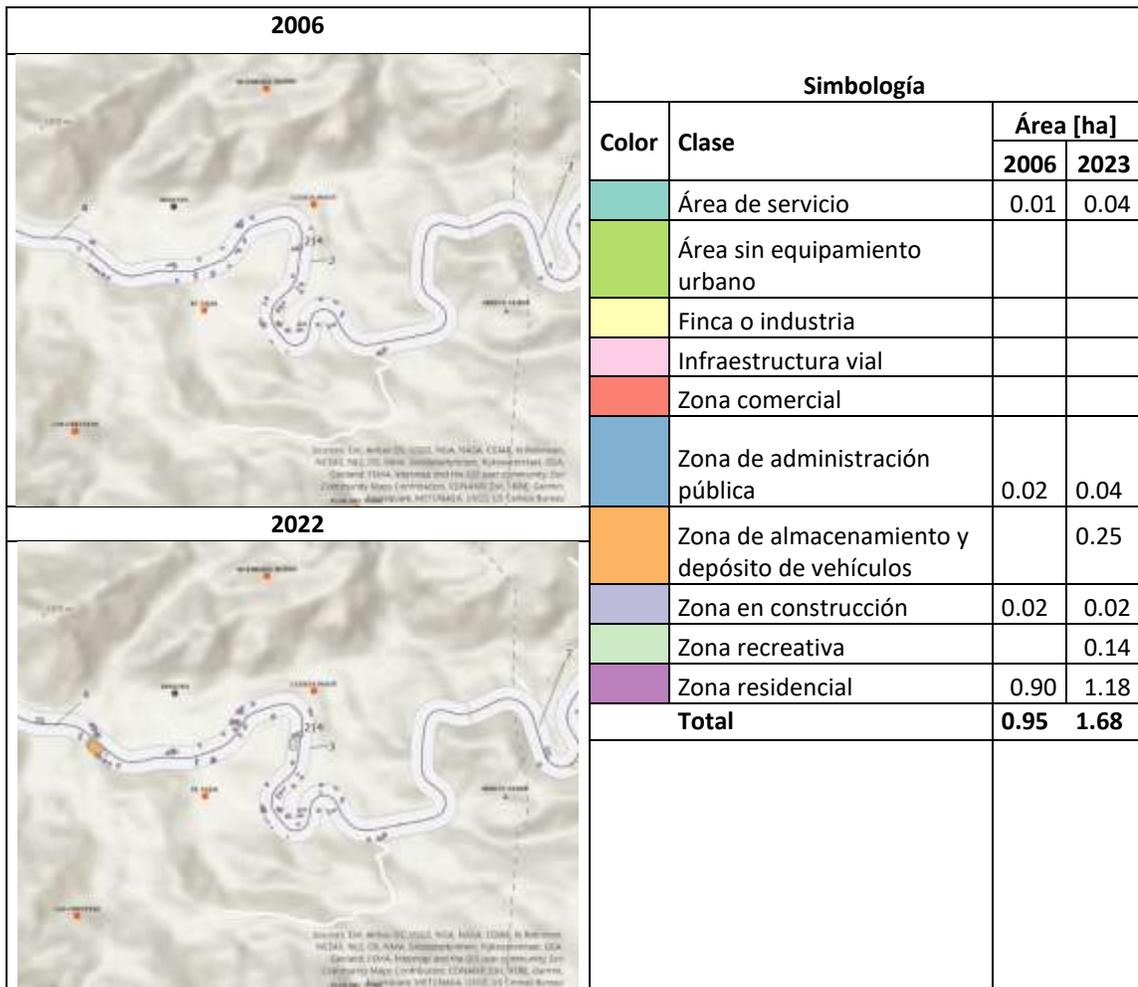
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 2

2006		Simbología		
Color	Clase	Área [ha]		
		2006	2023	
	Área de servicio			
	Área sin equipamiento urbano			
	Finca o industria		0.10	
	Infraestructura vial			
	Zona comercial			
	Zona de administración pública			
2022				
	Zona de almacenamiento y depósito de vehículos			
	Zona en construcción	0.02	0.36	
	Zona recreativa			
	Zona residencial	0.18	0.34	
	Total	0.20	0.80	

Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 8.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 3



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 9.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 4

2006		Simbología		
Color	Clase	Área [ha]		
		2006	2023	
	Área de servicio	0.05	0.05	
	Área sin equipamiento urbano			
	Finca o industria			
	Infraestructura vial			
	Zona comercial			
	Zona de administración pública	0.31	0.31	
2022				
	Zona de almacenamiento y depósito de vehículos		0.25	
	Zona en construcción		0.06	
	Zona recreativa			
	Zona residencial	0.49	0.69	
	Total	0.85	1.36	

Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 10.

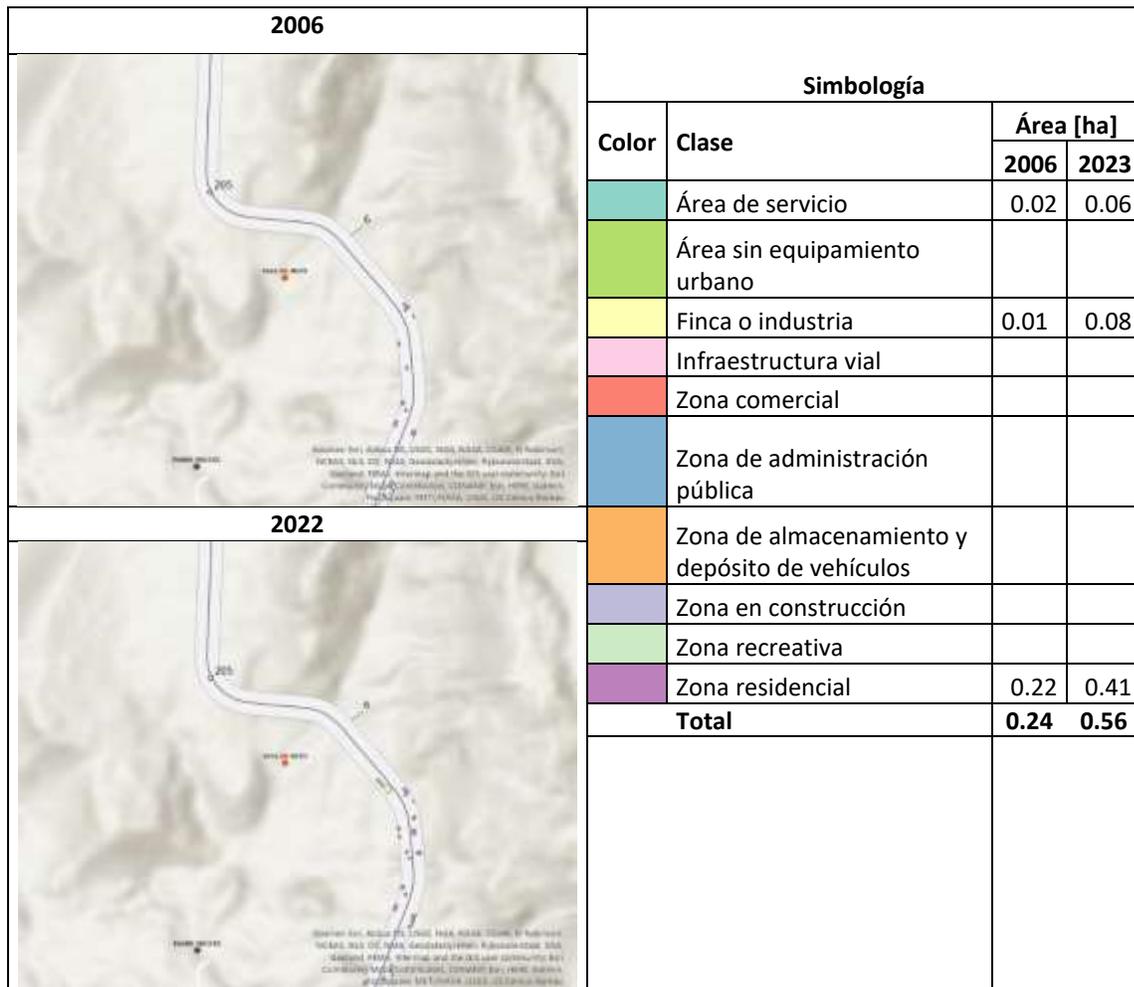
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 5

2006		Simbología			
Color	Clase	Área [ha]			
		2006	2023		
	Área de servicio	0.05	0.88		
	Área sin equipamiento urbano				
	Finca o industria	0.03	0.10		
	Infraestructura vial				
	Zona comercial	0.02	0.07		
	Zona de administración pública	0.08	0.08		
	Zona de almacenamiento y depósito de vehículos		0.25		
	Zona en construcción		0.06		
	Zona recreativa				
	Zona residencial	0.26	0.47		
	Total	0.44	1.61		

Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 11.

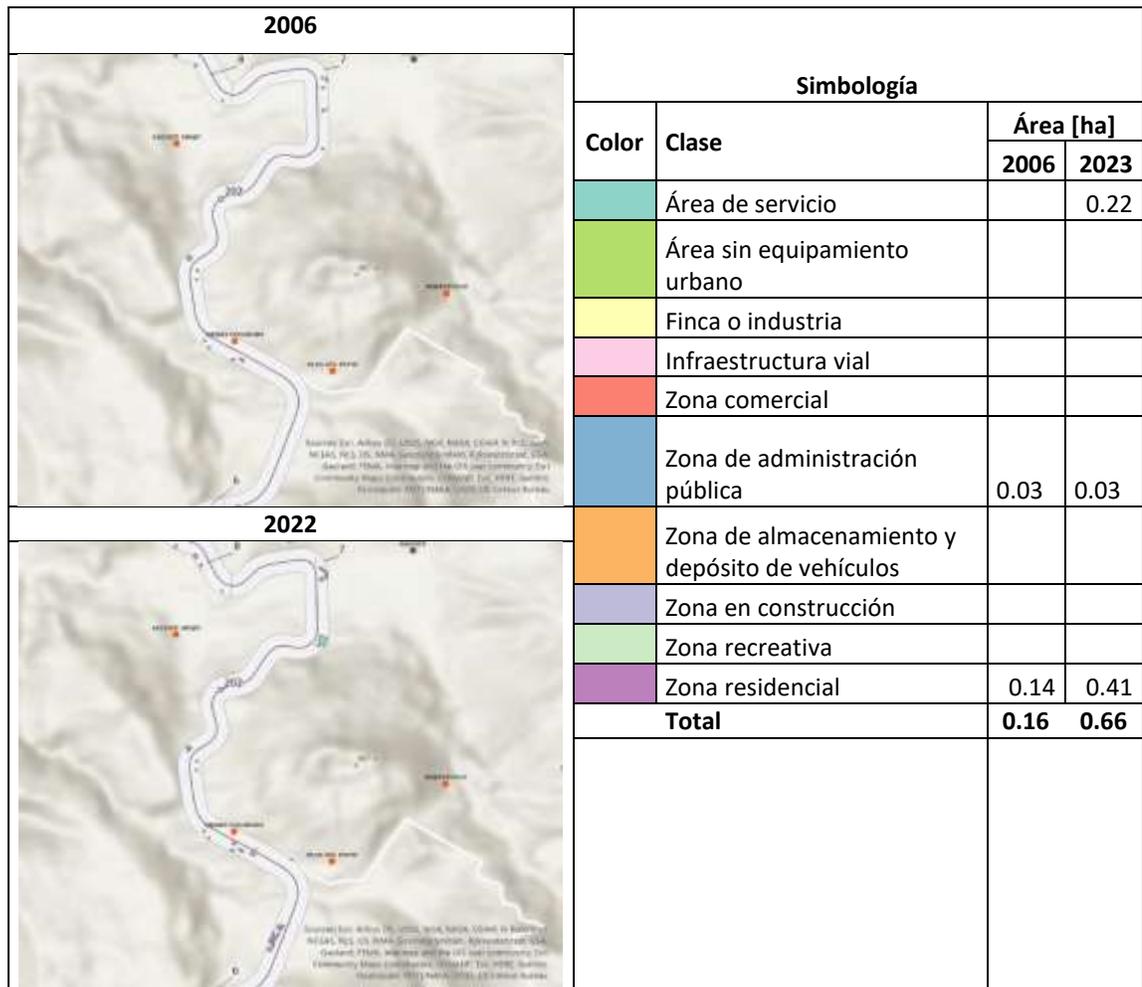
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 6



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 12.

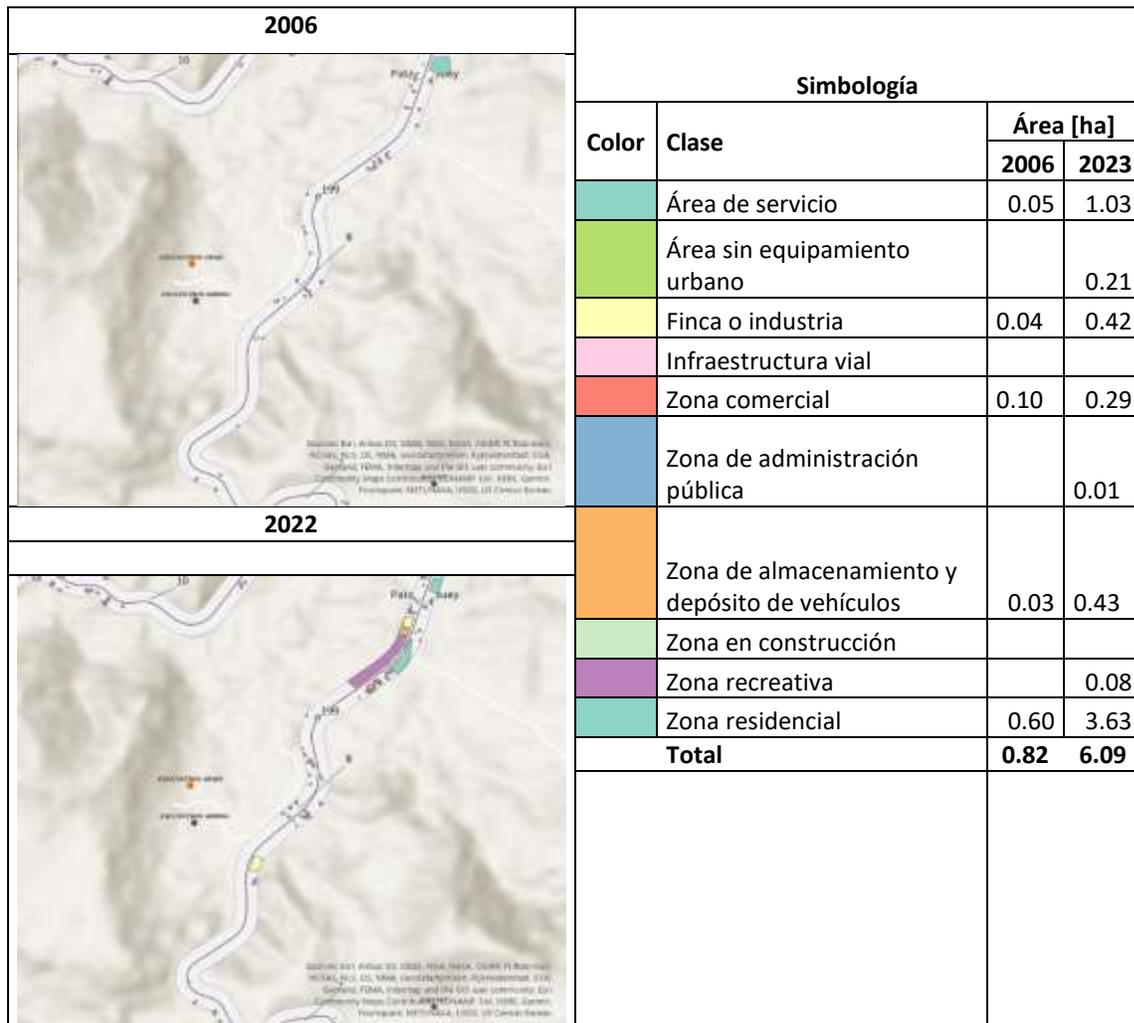
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 7



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 13.

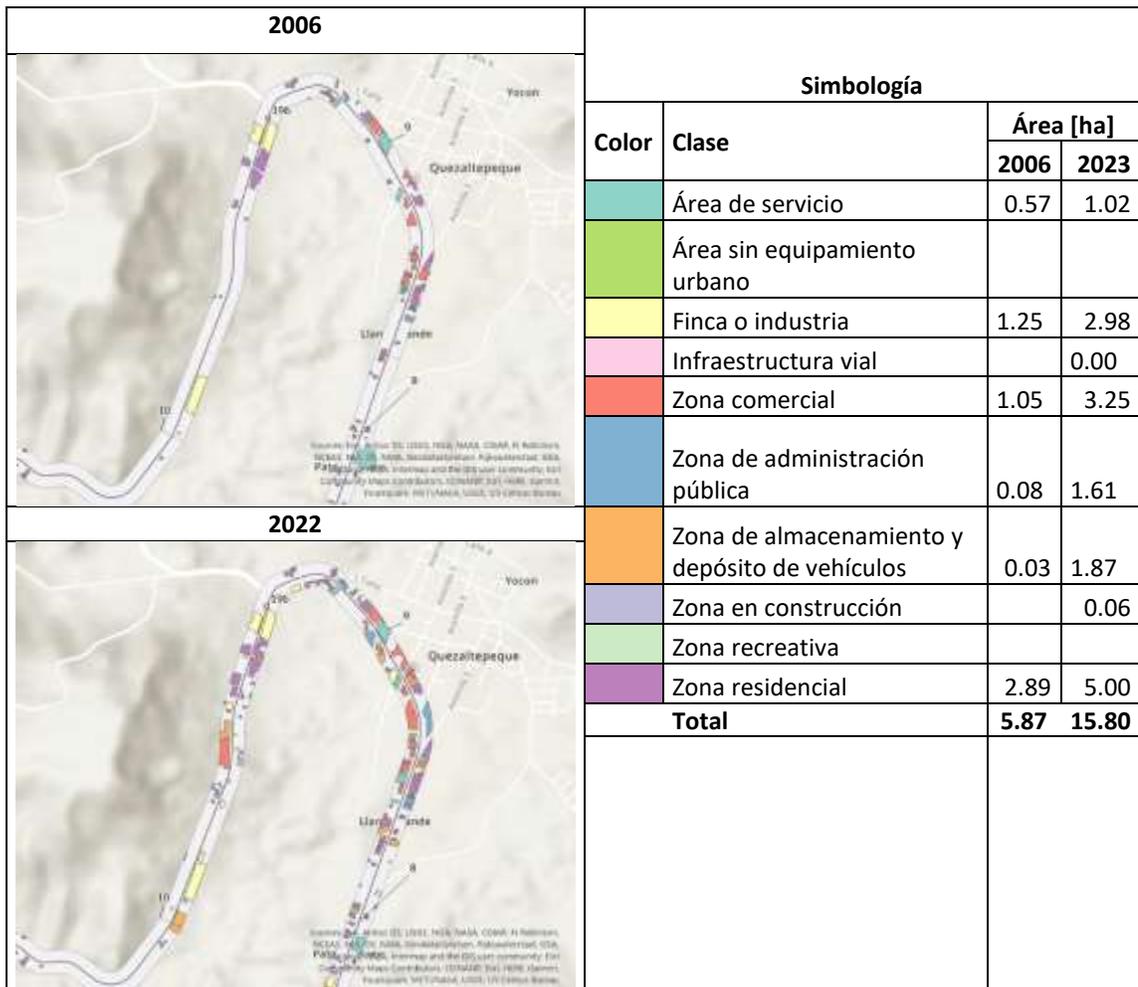
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 8



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 14.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 9



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 15.

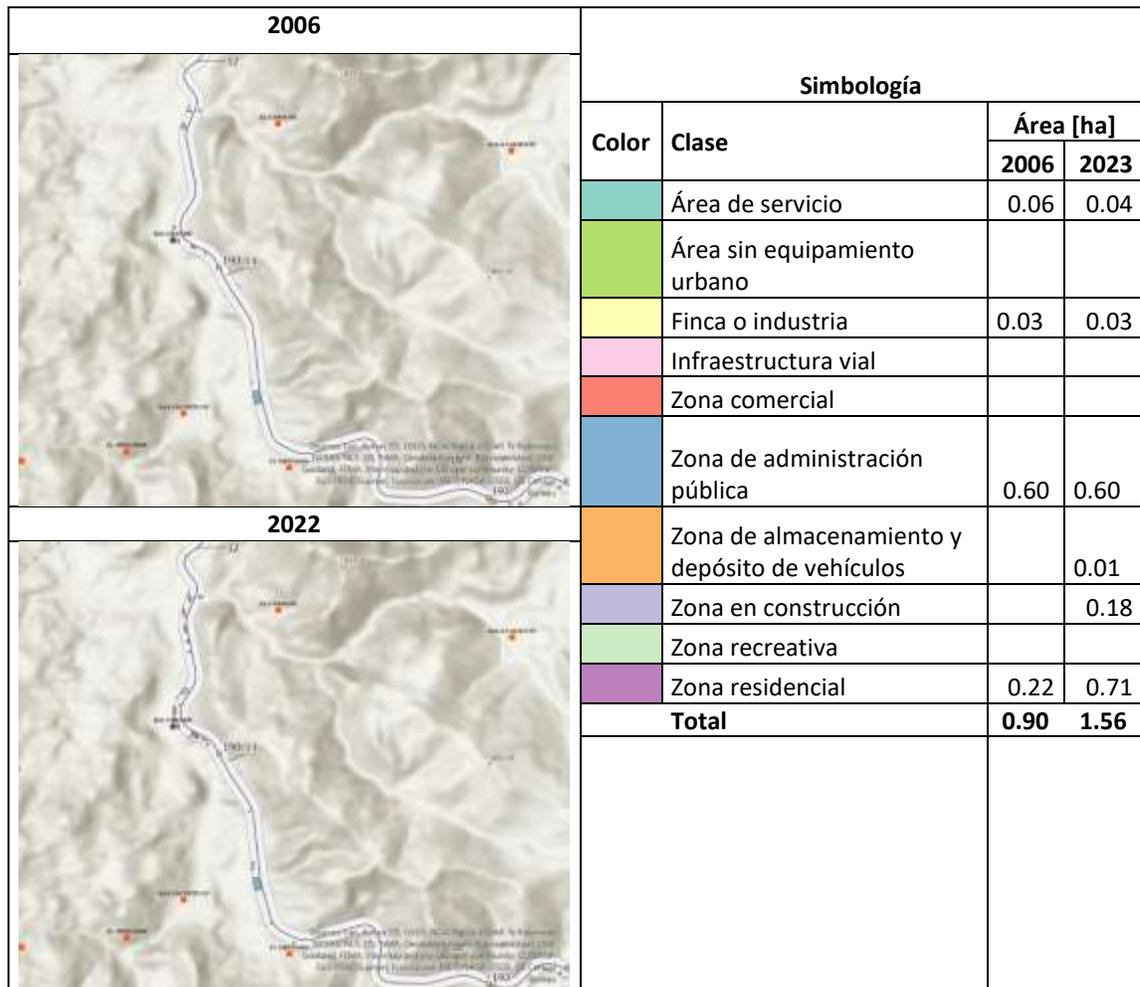
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 10

2006		Simbología		
Color	Clase	Área [ha]		
		2006	2023	
	Área de servicio		0.02	
	Área sin equipamiento urbano			
	Finca o industria	0.05	0.04	
	Infraestructura vial			
	Zona comercial			
	Zona de administración pública			
2022				
	Zona de almacenamiento y depósito de vehículos	0.13	0.48	
	Zona en construcción			
	Zona recreativa			
	Zona residencial	0.25	0.49	
	Total	0.44	1.03	

Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 16.

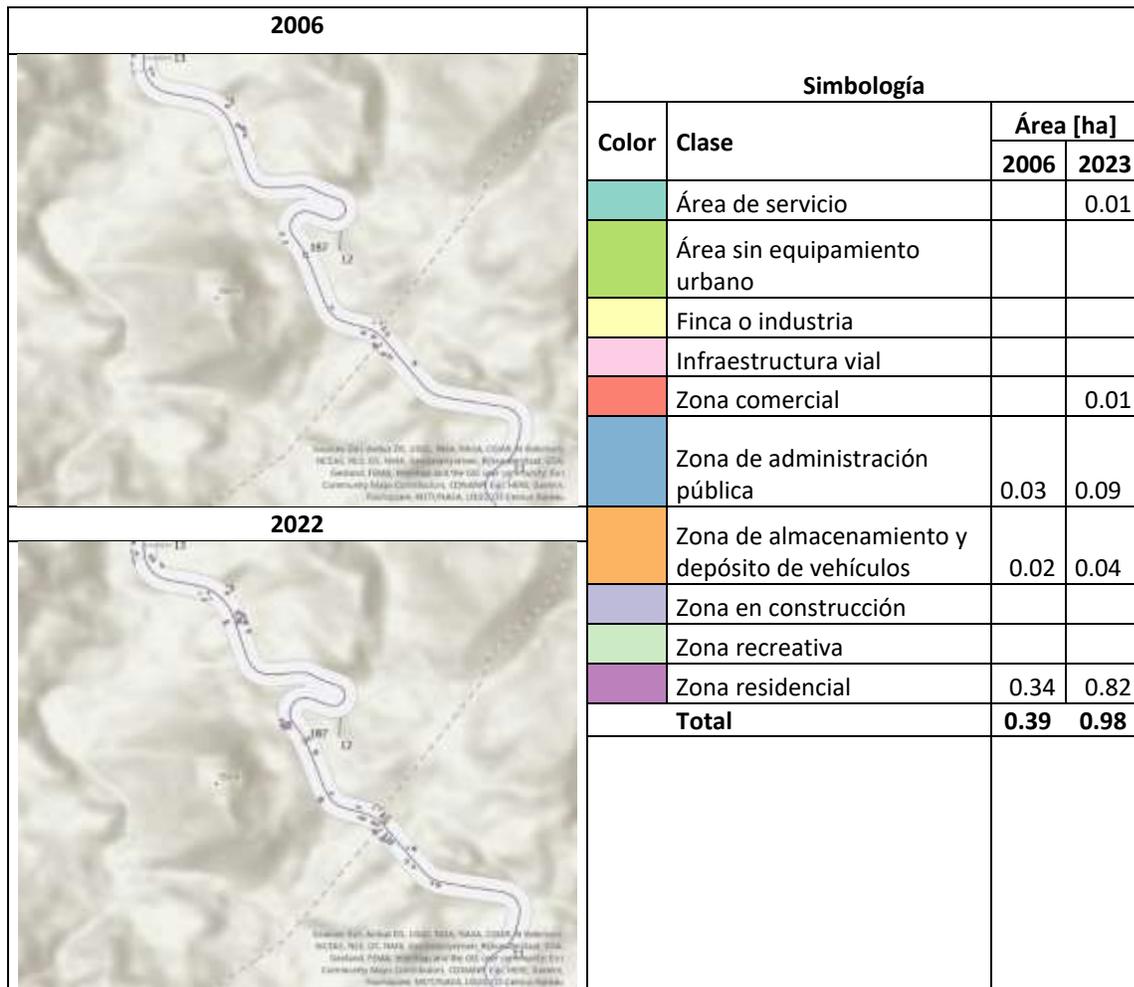
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 11



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 17.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 12



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 18.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 13

2006					
	Simbología		Área [ha]		
	Color	Clase	2006	2023	
		Área de servicio	0.07	0.68	
		Área sin equipamiento urbano		0.08	
		Finca o industria		0.02	
		Infraestructura vial		0.01	
		Zona comercial	0.16	0.28	
		Zona de administración pública	1.66	1.77	
2022					
		Zona de almacenamiento y depósito de vehículos	0.05	0.33	
		Zona en construcción	0.03	0.07	
		Zona recreativa		0.00	
		Zona residencial	2.33	3.79	
		Total	4.30	7.03	

Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 19.

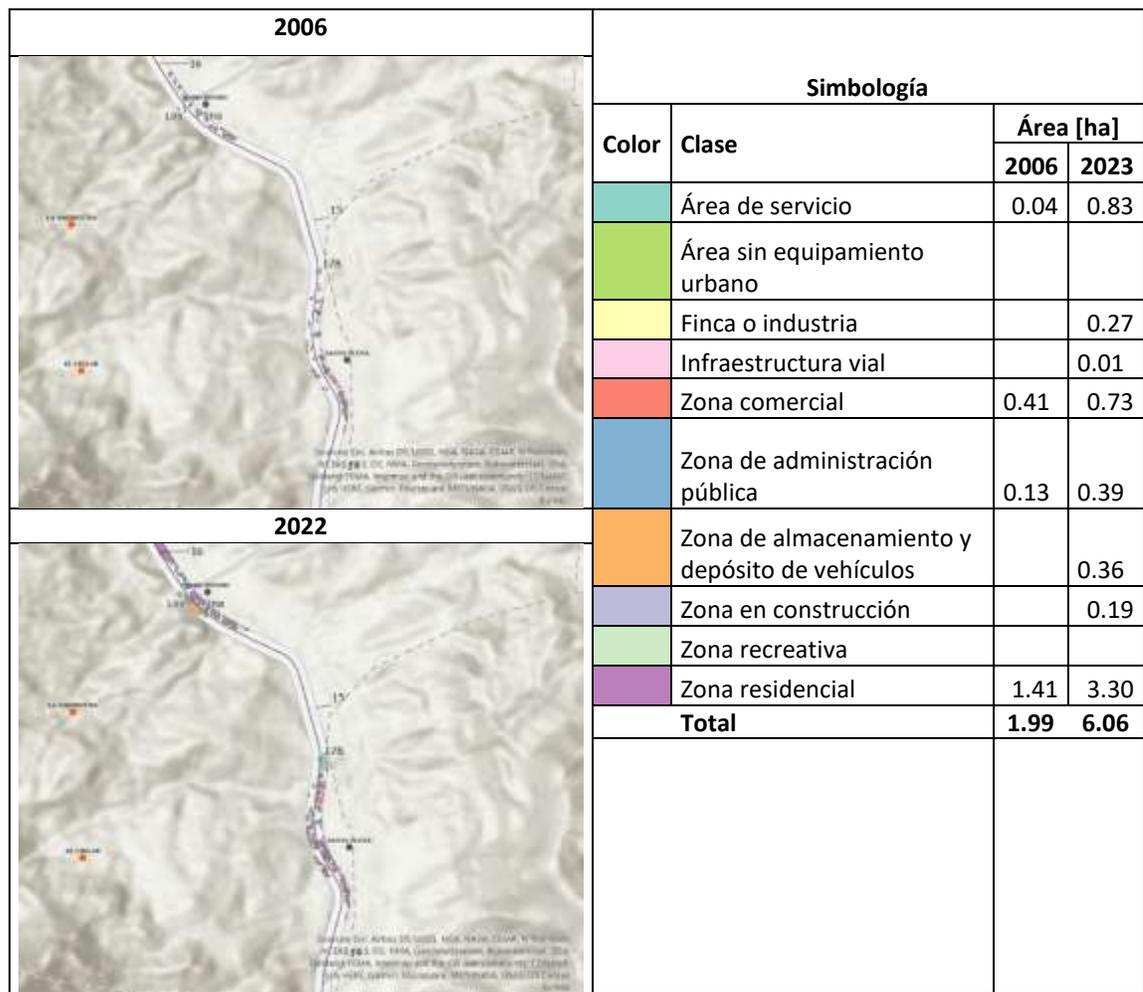
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 14

2006		Simbología		
Color	Clase	Área [ha]		
		2006	2023	
	Área de servicio	0.01	0.15	
	Área sin equipamiento urbano			
	Finca o industria	0.05	0.15	
	Infraestructura vial			
	Zona comercial	0.05	0.16	
	Zona de administración pública	0.11	0.39	
2022				
	Zona de almacenamiento y depósito de vehículos	0.02	0.74	
	Zona en construcción		0.41	
	Zona recreativa	0.04	0.08	
	Zona residencial	1.06	3.13	
	Total	1.35	5.23	

Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 20.

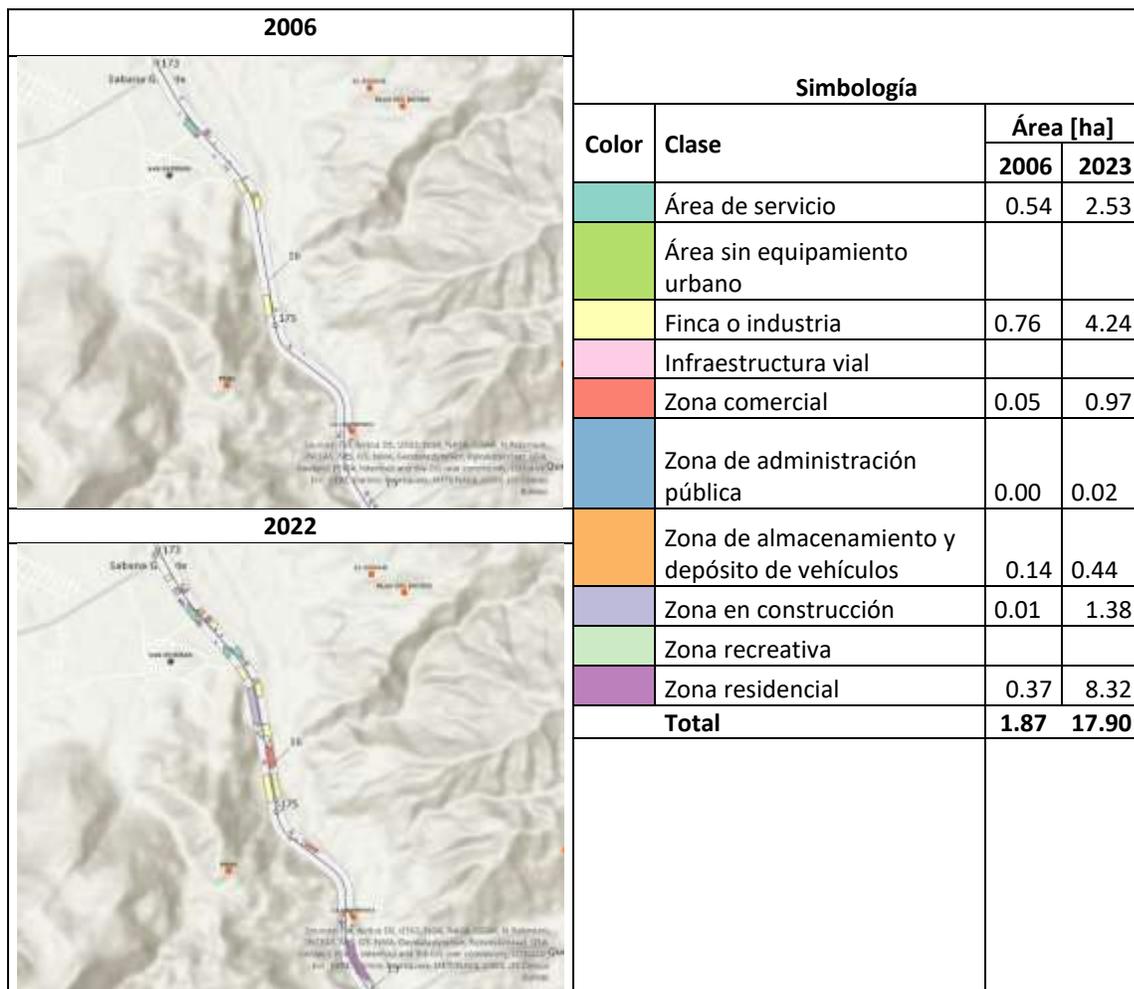
Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 15



Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 21.

Variación de la cantidad de equipamiento urbano en el subtramo 16



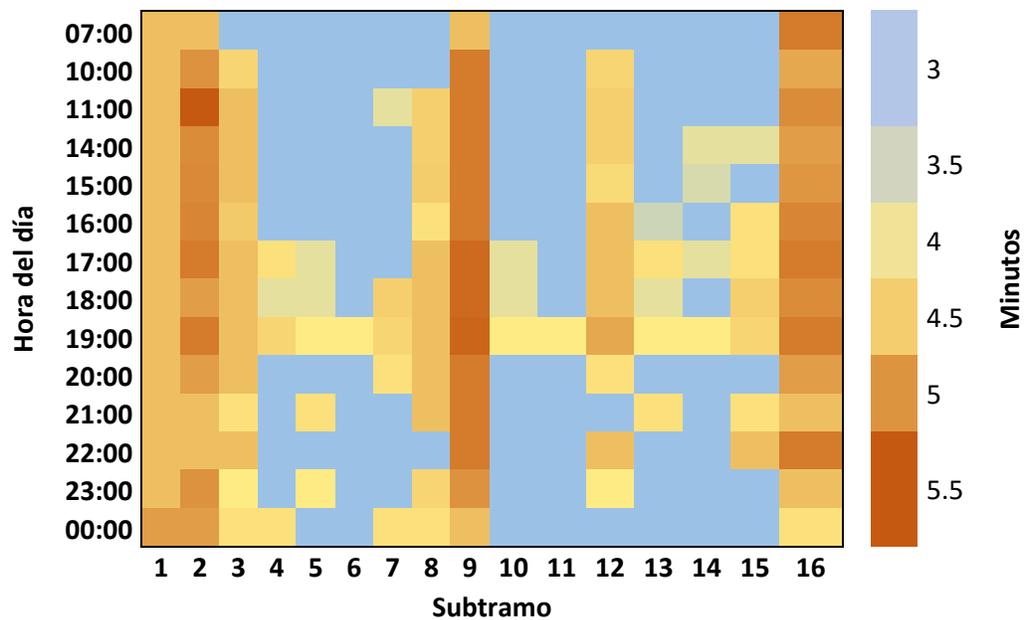
Nota. Variación de equipamiento urbano en el tramo de estudio ubicado en la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

2.3. Tiempo de recorrido por subtramo

A partir de la información del servicio de Google Maps, se obtuvo el tiempo de recorrido de los 16 subtramos de estudio. Los datos se tomaron por dos semanas en lapsos de una hora. En la Figura 22 y 23 se muestran los datos promedios por hora. Es importante mencionar que no se tienen datos de todas las horas del día.

Figura 22.

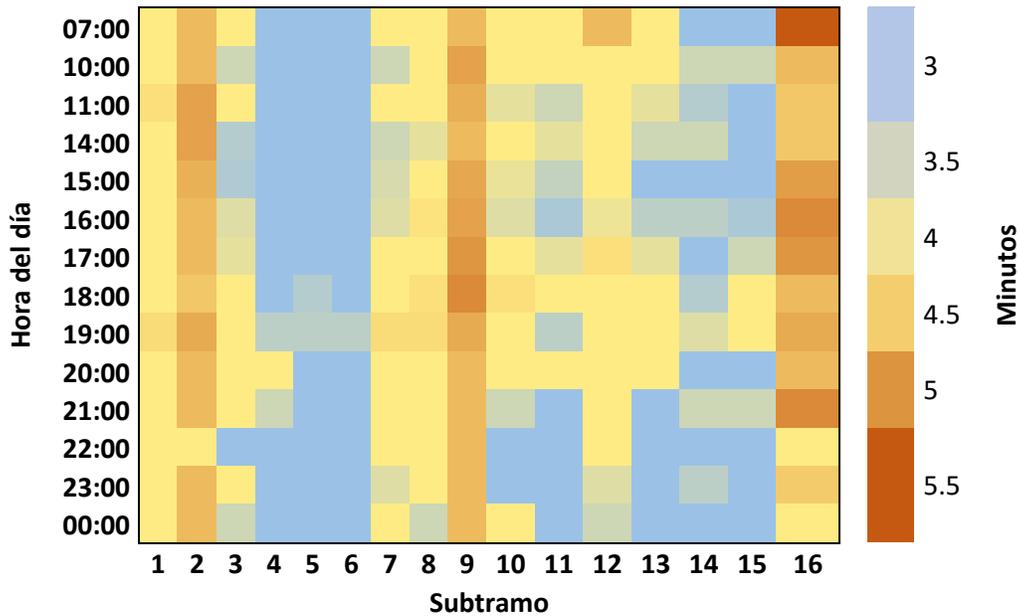
Mapa de calor del tiempo de recorrido en dirección Esquipulas-cruce de Ipala



Nota. Tiempo promedio de recorrido en minutos a diferentes horas del día en cada subtramo, dirección Esquipulas-Cruce de Ipala. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 23.

Mapa de calor del tiempo de recorrido en dirección Cruce de Ipala-Esquipulas

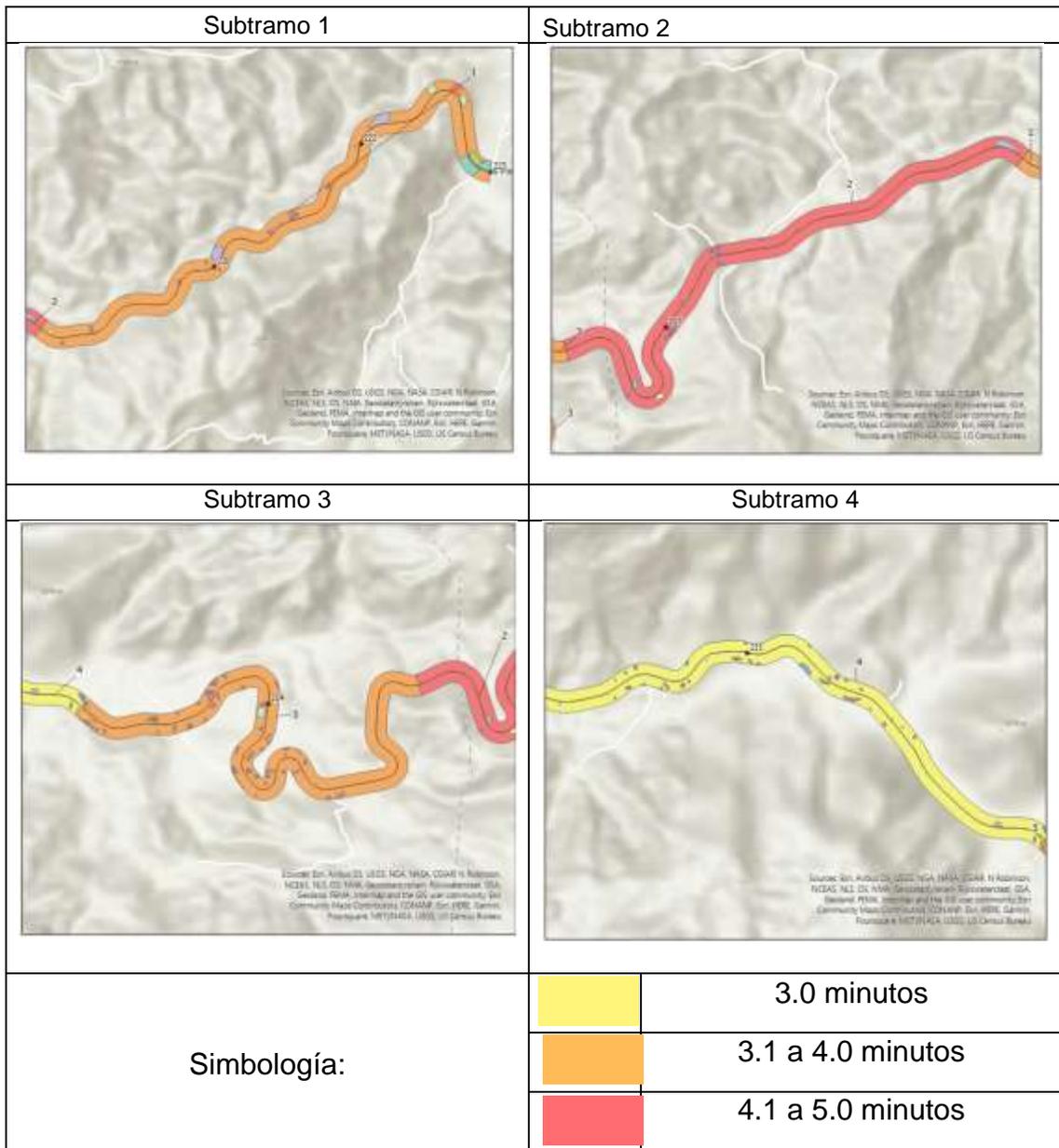


Nota. Tiempo de recorrido en minutos, a diferentes horas del día en cada subtramo, dirección Cruce de Ipala - Esquipulas. Elaboración propia, realizado con Excel.

Con el conjunto de datos de tiempo en distintos horarios, se calculó el promedio de tiempo de recorrido para cada subtramo y se hizo una comparación con relación al suelo ocupado por equipamiento urbano. Es importante mencionar que por facilidad de análisis de datos se nombra dirección A-B al recorrido que parte de Esquipulas hacia el cruce de Ipala y dirección B-A al recorrido que parte del Cruce de Ipala hacia Esquipulas. Las figuras de la 22 a la 38 contienen los resultados.

Figura 24.

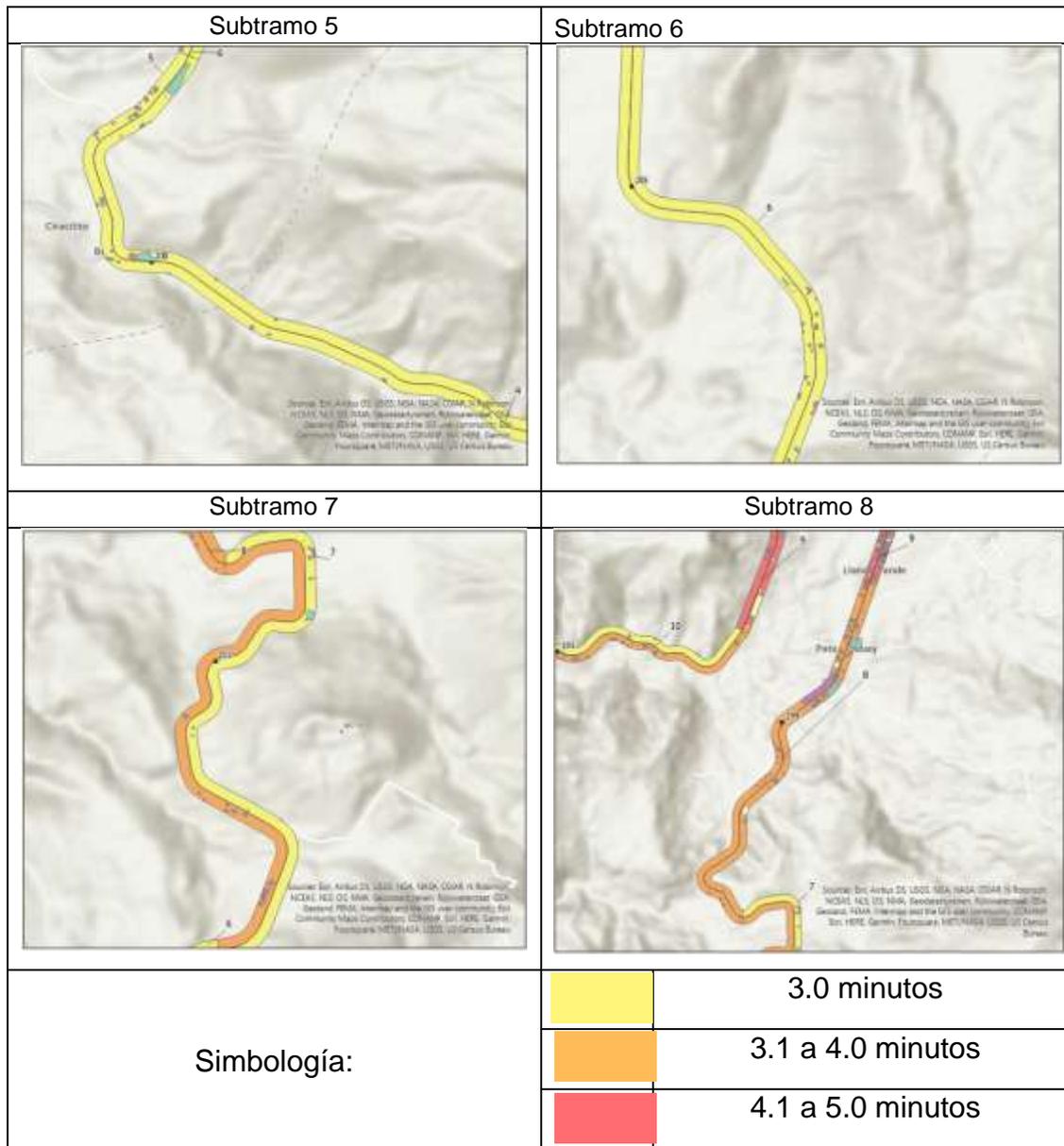
Tiempo de viaje subtramo 1-4



Nota. Tiempo de viaje por subtramo. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 25.

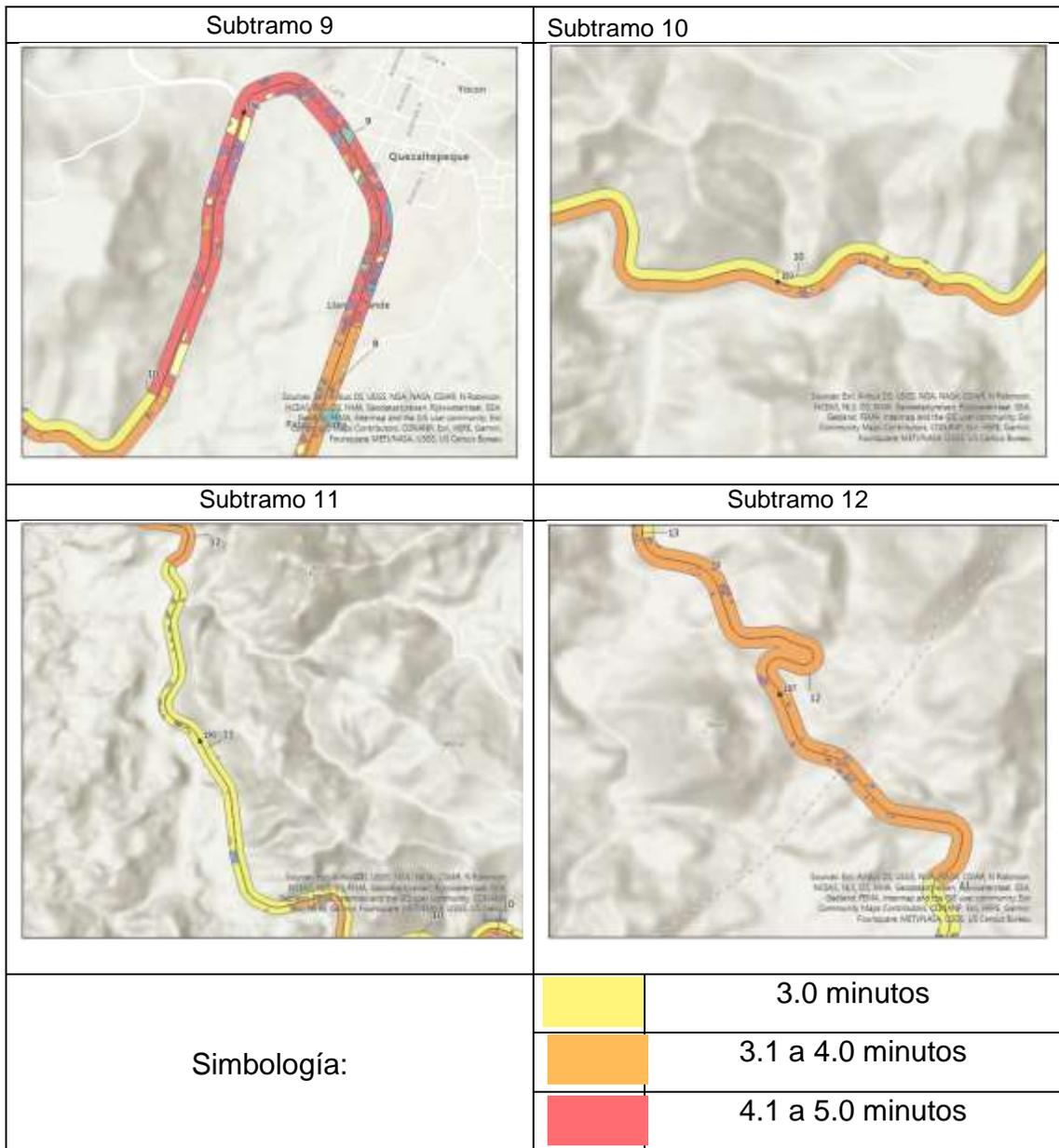
Tiempo de viaje subtramo 5-8



Nota. Tiempo de viaje por subtramo. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 26.

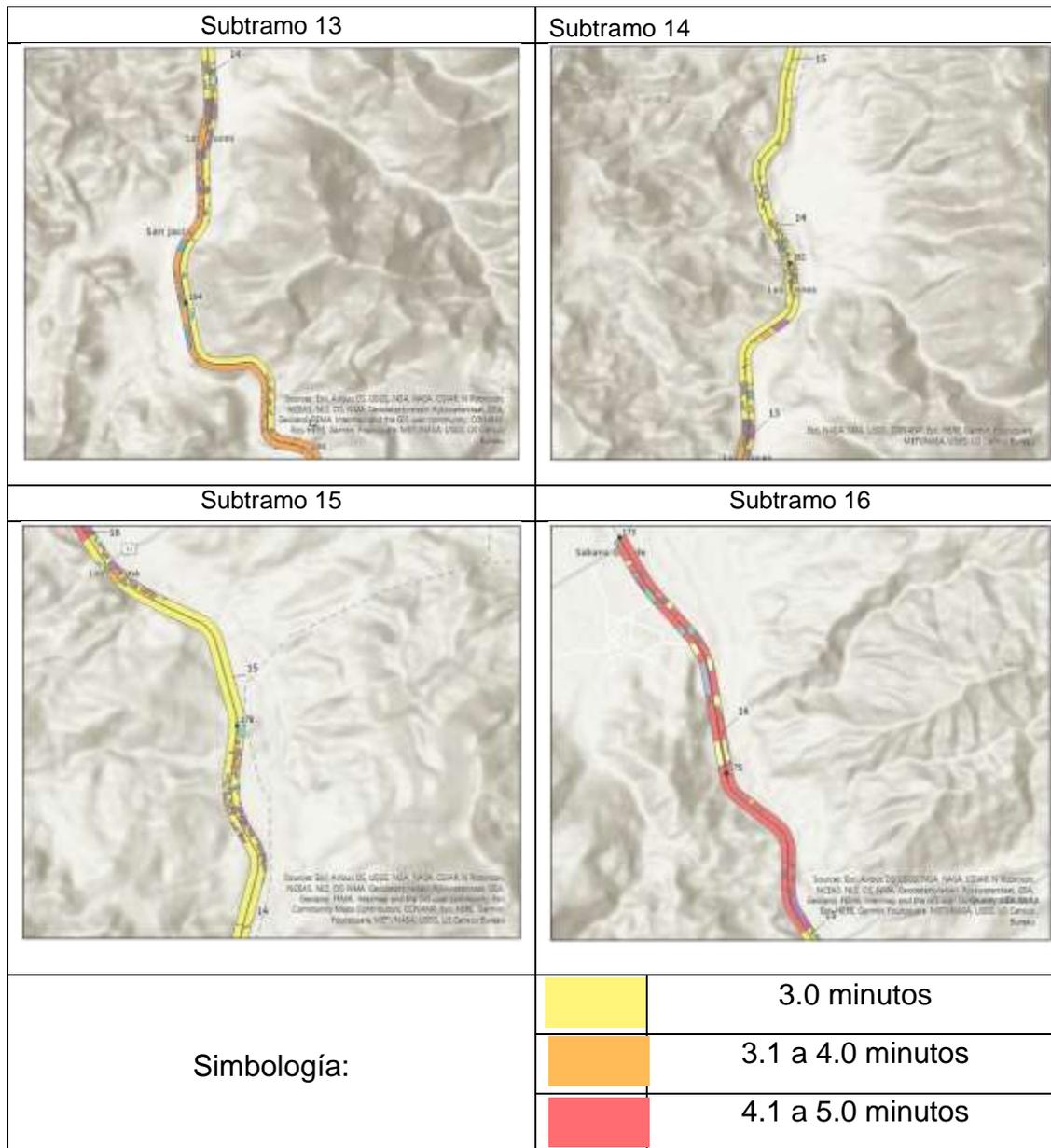
Tiempo de viaje subtramo 9-12



Nota. Tiempo de viaje por subtramo. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

Figura 27.

Tiempo de viaje subtramo 13-16



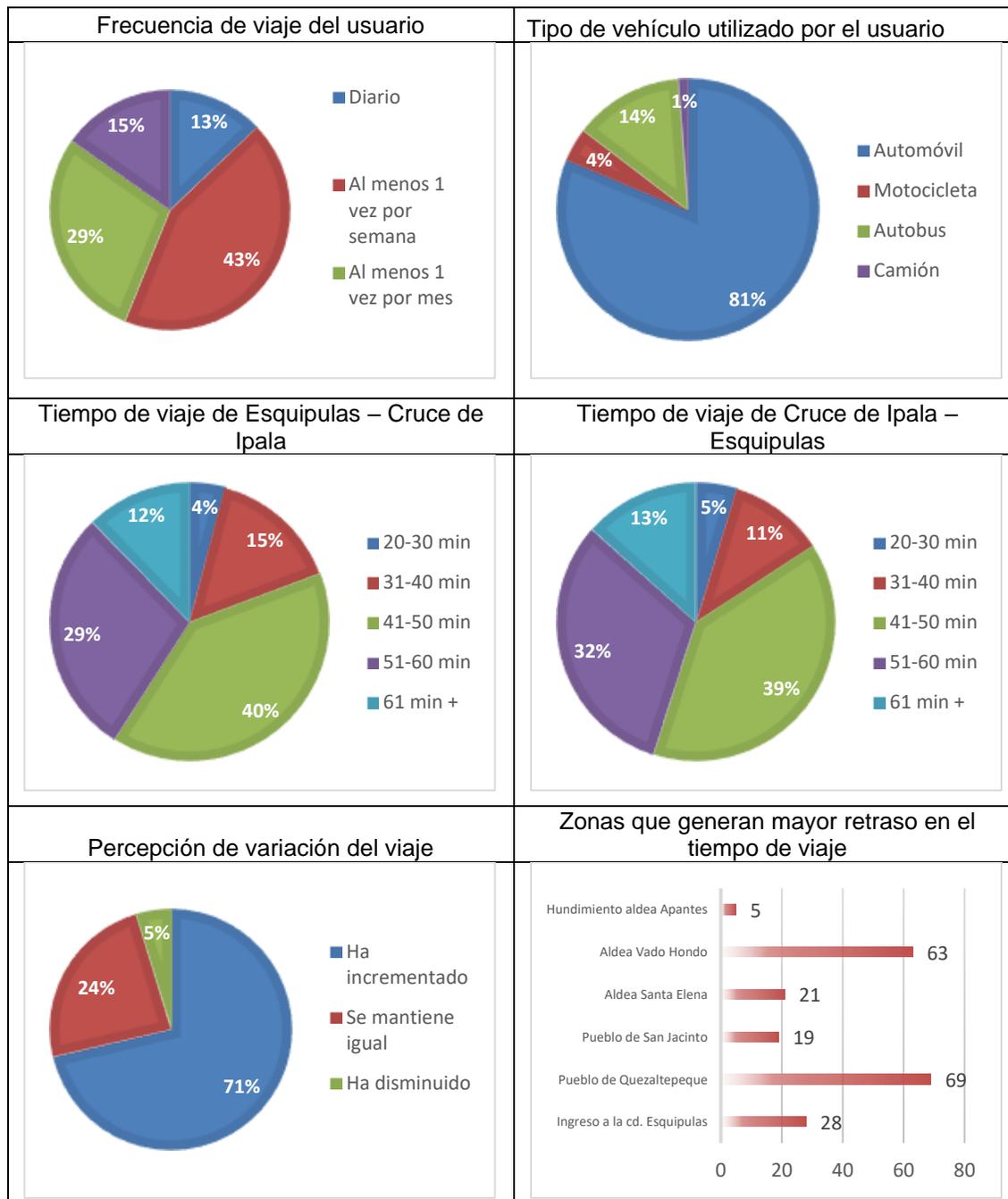
Nota. Tiempo de viaje por subtramo. Elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro-3.0 y Microsoft Excel.

2.4. Encuesta a usuarios de la carretera CA-10

Se extendió una encuesta digital a usuarios frecuentes de la carretera CA-10 y más específicamente en el tramo de estudio, el fin fue ampliar y complementar la información disponible para mejorar el análisis. El número de personas entrevistadas fue 171 que corresponde a la muestra calculada. La encuesta consistía en 5 preguntas, los resultados se muestran en la Figura 26.

Figura 28.

Resultados de la encuesta extendida a usuarios de la carretera CA-10



Nota. Resultados de encuestas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

2.5. Índice de ocupación de equipamiento urbano

Tomando en cuenta el tiempo de recorrido de cada subtramo y el área ocupada por cada clase, se calculó la contribución por clase de equipamiento urbano. La tabla 4 muestra los resultados.

Tabla 2.

Peso ponderado de cada clase de equipamiento urbano

Clase de equipamiento urbano	Peso ponderado
Área de servicio	12.09
Área sin equipamiento urbano	0.62
Finca o industria	13.08
Infraestructura vial	0.03
Zona comercial	9.51
Zona de administración pública	7.03
Zona de almacenamiento y depósito de vehículos	7.33
Zona en construcción	4.97
Zona recreativa	0.79
Zona residencial	44.55

Nota. Peso ponderado de cada clase de equipamiento urbano tomando en cuenta el tiempo de recorrido de cada subtramo. Elaboración propia, realizado con Excel.

En función del peso ponderado de las variables, se calculó el índice de influencia según clase de equipamiento urbano. Siete de los 16 subtramos corresponden a la hipótesis, mientras que el resto tienen ciertas variaciones. La Tabla 5 muestra todos los resultados.

Tabla 3.*Área estimada ocupada por clase de equipamiento urbano y tiempo de recorrido*

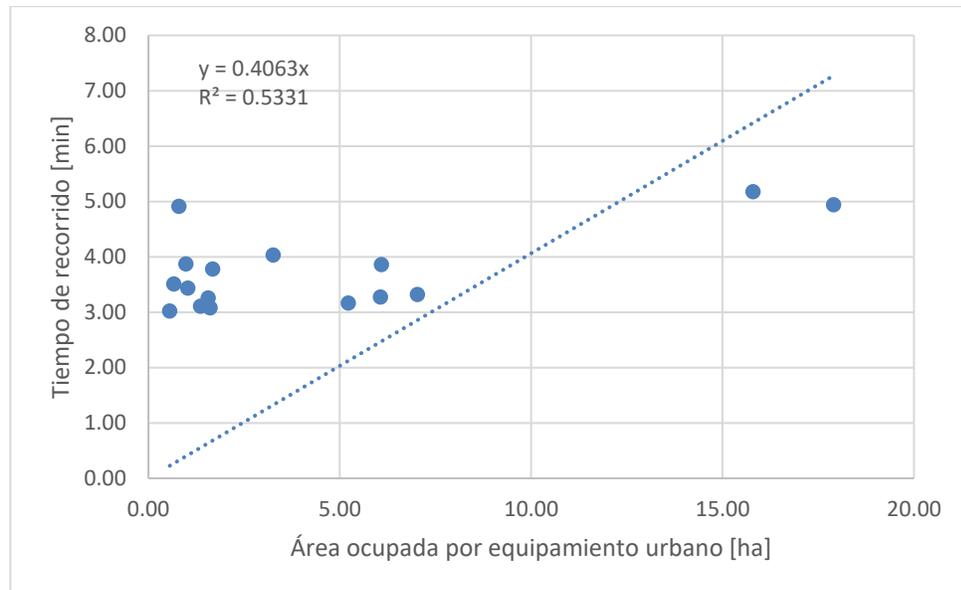
Subtramo	% Área ocupada	Velocidad [km/h]	Área ocupada por equipamiento urbano [ha]	Tiempo de recorrido [minutos]	Índice de influencia según clase de equipamiento urbano
1	10.85	44.63	3.26	4.03	0.01
2	2.66	36.63	0.80	4.91	0.01
3	5.59	47.63	1.68	3.78	0.02
4	4.53	57.88	1.36	3.11	0.01
5	5.37	58.51	1.61	3.08	0.01
6	1.86	59.56	0.56	3.02	0.01
7	2.20	51.29	0.66	3.51	0.01
8	20.30	46.64	6.09	3.86	0.06
9	52.65	34.76	15.80	5.18	0.11
10	3.42	52.44	1.03	3.43	0.01
11	5.19	55.29	1.56	3.26	0.01
12	3.26	46.52	0.98	3.87	0.01
13	23.44	54.20	7.03	3.32	0.07
14	17.42	56.86	5.23	3.17	0.05
15	20.22	54.97	6.06	3.27	0.06
16	53.98	41.07	17.90	4.94	0.14
Bajo	Percentil 50		Menor a 1.64	Menor a 3.47	Menor a 0.01
Medio	Entre percentil 50-70		1.64 - 5.65	3.47 - 3.86	Entre 0.02-0.05
Alto	Valores mayores al percentil 70		Mayor a 5.65	Mayor a 3.86	Mayor a 0.05

Nota. Detalle del área ocupada por clase de equipamiento urbano y tiempo de recorrido en cada subtramo. Elaboración propia, realizado con Excel.

A partir de los datos anteriores, se creó una gráfica de dispersión. Se calculó la ecuación del gráfico y se calculó el coeficiente de determinación. La gráfica se muestra en la figura

Figura 29.

Gráfica de dispersión de tiempo de recorrido contra área ocupada por equipamiento urbano



Nota. Correlación entre el área ocupada por clase de equipamiento urbano y tiempo de recorrido.
Elaboración propia, realizado con Excel.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados descritos en el capítulo 2. Se dividen por secciones como se muestra a continuación:

3.1. Variación de área ocupada por equipamiento urbano

La comparativa de equipamiento urbano instalado revela que, con relación al año 2006, para el año 2023 el área ocupada por equipamiento urbano se triplicó o bien se incrementó en un 227.8 %. La clase de zona residencial es la que mayor área ocupa actualmente con 32.98 ha, clase que se incrementó 21 hectáreas con relación al año 2006; la clase área de servicio también incrementó su área significativamente pasando de 2.49 ha en 2006 a 8.85 ha en 2022. De forma global, ninguna clase redujo su área de ocupación.

A continuación, se describe el comportamiento del equipamiento urbano en cada subtramo:

El subtramo 1, parte desde el ingreso a la ciudad de Esquipulas hasta el kilómetro 220, en este subtramo el equipamiento urbano se duplicó con relación al año 2006. Surgió equipamiento de las clases finca o industria, zona comercial, zona en construcción y áreas sin equipamiento urbano que hace referencia a terrenos nivelados y aplanados que posteriormente servirán para construir. Esto implica que en un futuro próximo la cantidad de equipamiento urbano se incrementará. Otro punto relevante es que se disminuyó la cantidad de zona residencial, esto se debe al cambio de uso del suelo, y también puede estar

relacionado con la instalación de asentamientos informales hechos con lámina o madera los cuales son fáciles de desmontar.

En el subtramo 2, la cantidad de equipamiento urbano se cuatriplicó con relación al año 2006. Un aspecto importante es que en 2006 el subtramo 2, era uno de los que menor cantidad de equipamiento urbano tenían además únicamente contenía dos clases: zona residencial y zona en construcción. Para el año 2023 ya se observa equipamiento correspondiente a la clase finca o industria. Agregado a lo anterior, en este subtramo hay 0.36 ha que pertenecen a la clase zona en construcción, esto implica que en un futuro cercano se incrementará el área ocupada por equipamiento urbano que por la tendencia de la zona podrían ser destinadas al uso residencial incrementando aún más el área ocupada por esta clase.

En el subtramo 3, la cantidad de equipamiento urbano se incrementó en un 76.84 %, pasando de 0.95 ha en 2006 a 1.68 ha en 2023. La clase con mayor ocupación es zona residencial (1.18 ha), esto guarda relación con la ubicación de dos caseríos y una aldea en el subtramo. Al comparar las clases de equipamiento urbano de 2006 con las de 2023, se observa que surgieron zonas de almacenamiento y depósito de vehículos, así como también una cancha de fútbol que pertenece a la clase zona recreativa.

En el subtramo 4, la cantidad de equipamiento urbano se incrementó en un 60 % pasando de 0.85 ha en 2006 a 1.36 ha en 2023. La clase con mayor presencia es zona residencial con 0.69 ha, esto en correspondencia a la existencia de un caserío en el área. Si bien la variación de área ocupada por equipamiento urbano es menor a otros subtramos, surgieron dos nuevas clases: zonas en construcción y zona de almacenamiento y depósito de vehículos.

En el subtramo 5, la cantidad de equipamiento urbano aumento 3.5 veces, pasando de 0.44 ha en 2006 a 1.61 ha en 2023. La cantidad de área ocupada por áreas de servicio incrementó significativamente tras la instalación de una nueva gasolinera, asimismo se incrementó la cantidad de viviendas y surgieron nuevas clases de equipamiento tales como: zona de almacenamiento y vehículos y zonas en construcción, de igual forma surgieron nuevos locales comerciales. Es importante mencionar que en este subtramo está el acceso a la carretera que dirige a la frontera Anguiatu, con El Salvador.

En el subtramo 6, la cantidad de equipamiento urbano se duplicó, pasando de 0.24 ha en 2006 a 0.54 ha 2023, a pesar de ello continúa siendo uno de los subtramos con menor cantidad de área ocupada por equipamiento urbano. En este subtramo únicamente hay tres clases, siendo la clase que más aporta, la zona residencial (0.41 ha), seguido de finca o industria (0.08 ha) y finalmente área de servicio (0.06 ha).

En el subtramo 7, la cantidad de equipamiento urbano se duplicó, pasando de 0.16 ha en 2006 a 0.41 ha en 2023. En este subtramo únicamente hay presencia de 3 clases: área de servicio, zona de administración pública y zona residencial. Siendo la última la que más aporta (0.41 ha). Es importante resaltar, que el área de servicio surgió en los últimos años con la inauguración de un restaurante.

En el subtramo 8, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 0.82 ha en 2006 a 6.09 ha en 2023. La clase que más crecimiento tuvo fue la zona residencial que pasó de 0.60 ha a 3.63 ha, asimismo las áreas de servicio que pasaron de 0.05 ha a 1.03 ha, siendo un incremento significativo. En la misma línea surgieron nuevas clases como zonas de administración pública, zonas recreativas y áreas sin equipamiento urbano que corresponden a terrenos baldíos

o aplanados y nivelados. Es importante mencionar que esta área está cerca de la ciudad de Quezaltepeque, evidenciando así que las zonas aledañas a la carretera están absorbiendo la expansión de la ciudad.

En el subtramo 9, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 5.87 ha en 2006 a 15.80 ha en 2023. Este subtramo es uno de los que mayor equipamiento aporta en el área total de análisis. El crecimiento urbano fue significativo que además contiene diversidad de clases de equipamiento urbano. Algunos puntos relevantes del sector es el incremento del equipamiento correspondiente a zona comercial, esto se debe a la construcción del mercado municipal, surgimiento de diversas plazas comerciales, así como también la adecuación de viviendas para funcionar como locales comerciales; dentro del crecimiento también se puede mencionar el incremento de las áreas de servicio y zonas residenciales. La diversidad de clases de equipamiento urbano y la densidad de este ha provocado que la carretera se constituya como parte de la ciudad y actúe como una calle urbana más, por lo que ha sido necesario instalar túmulos en el sector para evitar que los vehículos conduzcan a altas velocidades y generen accidentes.

En el subtramo 10, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 0.44 ha en 2006 a 1.03 ha en 2023. Esta zona no está tan poblada como el subtramo anterior, ni muestra un incremento significativo en el área ocupada por equipamiento urbano.

En el subtramo 11, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 0.90 ha en 2006 a 1.56 ha en 2023. La clase zona residencial es la que más aporta en el subtramo (0.71 ha). De este subtramo 0.18 ha corresponde a zona en construcción, lo que implica que en un futuro cercano habrá un incremento en determinadas clases de equipamiento urbano.

En el subtramo 12, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 0.39 ha en 2006 a 0.98 ha en 2023. En 2006 más del 80 % del equipamiento urbano de este subtramo correspondía a zona residencial, esta tendencia se mantiene en 2023. Agregado a lo anterior, se observa el surgimiento de áreas de servicio y zonas comerciales.

En el subtramo 13, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 4.30 ha en 2006 a 7.03 ha en 2023. Este subtramo contiene equipamiento correspondiente a todas las clases, lo que implica una fuerte y diversa presencia urbana, en correspondencia a la presencia de dos aldeas y el pueblo de San Jacinto. En línea con lo anterior, la clase zona residencial es la que más aporta (3.79 ha), seguida de zonas de administración pública (1.77 ha) y áreas de servicio (0.68 ha).

En el subtramo 14, el área ocupada por equipamiento urbano pasó de 1.35 ha en 2006 a 5.23 ha en 2023. Este subtramo, al igual que el anterior, contiene todas las clases de equipamiento urbano lo que implica una fuerte y diversa presencia urbana, agregado a ello, en el kilómetro 185 hay una zona de hundimiento en donde los usuarios de la carretera deben reducir la velocidad. La clase con mayor presencia es la zona residencial (3.13 ha), seguida de zonas de administración pública (0.39 ha) y zona de almacenamiento y depósito de vehículos (0.74 ha).

En el tramo 15, el área ocupada por equipamiento urbano se incrementó pasando de 1.99 ha en 2006 a 6.06 ha en 2023. Se observa el surgimiento de nuevas clases tales como: finca o industria, zona de almacenamiento y depósitos de vehículos, zonas en construcción y también la instalación de una pasarela que constituye infraestructura vial que es un indicador de una concentración humana importante. En concordancia con lo anterior, se observa que la zona residencial

pasó de 1.41 ha a 3.30 ha, representando el 54.46 % del equipamiento urbano presente en el subtramo.

En el subtramo 16, el área ocupada por equipamiento urbano se incrementó significativamente, pasando de 1.87 ha en 2006 a 17.90 ha en 2023, siendo el subtramo que más aporta al tramo de estudio. La mayor parte de este crecimiento se debe a la clase de zona residencial que ocupa el 46.48 %, seguido de fincas o industrias (23.69 %) y áreas de servicio (14.13 %). En este sector se han instalado grandes fincas de ganado y también bodegas de productos.

3.2. Tiempo de recorrido

A partir de los datos recopilados se determinó que se requiere mayor tiempo para trasladarse desde el cruce de Ipala hacia Esquipulas (62 minutos) que en la dirección contraria (58 minutos).

Agregado a lo anterior, a través de los mapas de calor se determinó que en dirección Esquipulas-Cruce de Ipala, las horas de mayor demanda van desde las 17 horas hasta las 19; también se observó que a las 00:00 hay un incremento en el tiempo de recorrido entre los subtramos 1 al 9, que puede estar relacionado con la circulación de transporte pesado. Es importante resaltar que el tramo indicado corresponde a la conexión de Esquipulas con ciudad de Quezaltepeque y que además conecta con la carretera que va hacia la Frontera Anguiatu donde hay circulación importante de transporte pesado.

Agregado a lo anterior, se determinó que en esta dirección los tramos con mayor tiempo de recorrido son 1, 2, 3, 8, 9, 12 y 16. En estos subtramos, el tiempo de recorrido se mantiene constante la mayor parte del día.

Por otra parte, el mapa de calor del tiempo de recorrido en dirección cruce de Ipala a Esquipulas muestra que la mayor parte del día se tiene alta demanda haciéndose incluso más alta a las 19:00 horas. Los subtramos con mayor tiempo de recorrido son 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 12 y 16.

Después de comparar ambos mapas de calor, se encontró que el tramo de Esquipulas-Cruce de Ipala tiene menos subtramos con tiempos de recorrido prolongados (7 subtramos) que en la dirección opuesta (9 subtramos); sin embargo, los tiempos de recorrido en esta dirección son mayores pues van de 5 a 5.5, mientras que en los subtramos identificados en dirección Cruce de Ipala a Esquipulas van en su mayoría de 4 a 4.5, que al ser más subtramos con este tiempo provocan que el tiempo de recorrido sea superior en dirección Cruce de Ipala-Esquipulas.

3.3. Comparativa de tiempo de viaje con porcentaje de equipamiento urbano por clase

En el subtramo 1, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 4 minutos. En este subtramo, 10.85 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante área de servicio, que corresponde a los hoteles y la gasolinera ubicada en la entrada a la ciudad de Esquipulas.

En el subtramo 2, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 5 minutos. Únicamente el 2.66 % del área está ocupada por equipamiento urbano; sin embargo, en el kilómetro 217 hay una zona de hundimiento que ha generado que en el año 2022 y 2023 deban hacerse trabajos de reparación significativos por los que estaba habilitado únicamente un carril de

paso y posteriormente al habilitarse ambos carriles se instalaron túmulos en la zona. Esta situación ha impactado significativamente en el tiempo de recorrido.

En el subtramo 3, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 4 minutos. El 5.59 % del área del subtramo está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante la zona residencial. Es importante mencionar que el tiempo de recorrido puede estar influenciado por el congestionamiento vial que genera la reparación de la zona de hundimiento del kilómetro 217.

En el subtramo 4, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 3 minutos. En este subtramo el 4.53 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante zona residencial.

En el subtramo 5, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 3 minutos. En este subtramo el 5.37 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante área de servicio, que corresponde a la instalación de 2 gasolineras, un restaurante y varias tiendas de conveniencia.

En el subtramo 6, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 3 minutos. El 1.86 % del área está ocupada por equipamiento urbano siendo el más bajo de todos los subtramos. La clase predominante de equipamiento urbano es la zona residencial.

En el subtramo 7, el tiempo de recorrido en dirección A-B es de 3 minutos, mientras que en dirección B-A es de 4 minutos. En este subtramo el porcentaje de ocupación de equipamiento urbano es de 2.20 % siendo la clase predominante la zona residencial.

En el subtramo 8, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 4 minutos. En este subtramo ya se empieza a observar la influencia del pueblo de Quezaltepeque, pues el 20.30 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante la zona residencial.

En el subtramo 9, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 5 minutos. Este subtramo está a la altura del pueblo de Quezaltepeque, esto es sensible debido a que el 52.65 % del área está ocupada por equipamiento urbano, hay presencia de distintas clases, pero la predominante es la zona residencial. Es importante mencionar que dentro de este tramo se han instalado túmulos, lo cual también impacta en la velocidad y por tanto en el tiempo de recorrido.

En el subtramo 10 el tiempo de recorrido en dirección A-B es de 3 minutos, mientras que en dirección B-A es de 4 minutos, esto puede estar relacionado con el ingreso al pueblo de Quezaltepeque. En este subtramo el área ocupada por equipamiento urbano es de 3.42 %, siendo la clase predominante la zona residencial. Es importante notar que la mayor parte del equipamiento se encuentra en la zona paralela al tramo en dirección B-A lo cual también podría estar impactando en el tiempo de viaje.

En el subtramo 11, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 3 minutos. En este subtramo el 5.19 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante la zona residencial.

En el subtramo 12, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 4 minutos, este tiempo puede estar relacionado a la cercanía del pueblo de San Jacinto. En este subtramo el 3.26 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante la zona residencial.

En el subtramo 13, el tiempo de recorrido en la dirección A-B es de 3 minutos, mientras que en dirección B-A es de 4 minutos. Esta variación en el tiempo puede deberse que el ingreso a la ciudad de San Jacinto se encuentra en la zona aledaña al tramo en dirección B-A. En este subtramo el 23.44 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante la zona residencial.

En el subtramo 14, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 3 minutos. El porcentaje de ocupación de equipamiento urbano es de 17.52 % siendo la clase predominante la zona residencial. Este subtramo pasa a la altura de una aldea de San Jacinto lo cual explica la alta cantidad de equipamiento urbano de la clase residencial. Cabe resaltar que en este tramo también hay una zona de hundimiento que perjudica el funcionamiento de la carretera.

En el subtramo 15, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 3 minutos. El 20.22 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo la clase predominante la zona residencial. Es importante resaltar que dentro de este subtramo se encuentra el acceso a la carretera que conduce hacia la frontera El Florido, con Honduras.

En el subtramo 16, el tiempo de recorrido en ambas direcciones (A-B y B-A) es de 5 minutos. El 53.98 % del área está ocupada por equipamiento urbano, siendo el subtramo con mayor porcentaje. Agregado a lo anterior es importante decir que dentro de este subtramo se instaló un puesto interinstitucional de Coincon, lo que también genera complicaciones en el paso vehicular.

3.4. Encuesta a usuarios

El 13 % de los usuarios entrevistados indicó que viaja diariamente por el tramo de estudio y el 43 % lo hace al menos una vez por semana, por tanto, los resultados son confiables ya que buen porcentaje de las respuestas vienen de personas que recorren de manera frecuente el tramo de interés.

Con relación al tipo de vehículo el 81 % se moviliza en automóvil, este punto es positivo ya que los tiempos determinados a través del servicio de Google Maps corresponden a recorridos de automóviles lo que permite hacer comparaciones.

Para el tiempo de recorrido de Esquipulas hacia el Cruce de Ipala el 40 % indicó que se tarda de 41 a 50 minutos, el 29 % de 51 a 60 minutos y 12 % más de 61 minutos. El resto de las personas (19 %) indicó tardarse menos de 40 minutos.

En dirección Cruce de Ipala hacia Esquipulas el 39 % indicó que se tarda de 41 a 50 minutos, el 32 % de 51 a 60 minutos y el 13 % más de 61 minutos. El resto de las personas (16 %) indicó tardarse menos de 40 minutos.

Estos resultados coinciden con los obtenidos a través del servicio de Google, pues indican que es más tardado movilizarse desde el cruce de Ipala hacia Esquipulas que en dirección contraria.

Con relación a la variación de tiempo de viaje, el 71 % de los encuestados indicaron que ha incrementado, el 24 % que se mantiene igual y solo el 5 % indicaron que se ha disminuido.

Entre las personas entrevistadas, 63 (36 %) indicaron que el pueblo de Quezaltepeque es la zona que genera mayores retrasos en el tiempo de viaje del tramo de estudio, seguida de la aldea de Vado Hondo. En estas zonas se observa un incremento significativo de equipamiento urbano con relación al año 2006, para el caso del tramo 9 que es el que está a la altura del pueblo de Quezaltepeque se triplicó, situación similar para la aldea Vado Hondo que se encuentra entre el tramo 15 y 16, además dentro de esta zona se instaló el puesto de Coincon lo que fue ampliamente señalado por los usuarios.

Otro punto señalado por 28 personas (16 %) fue el ingreso a la ciudad de Esquipulas, el cual se encuentra en el primer subtramo y que, si bien cuenta con el 10 % de su área ocupada por equipamiento urbano, esta área se duplicó con relación al año 2006. También se señaló la aldea Santa Elena que corresponde al inicio del subtramo 15 y en el cual se observa un incremento significativo de equipamiento urbano con relación a 2006.

El pueblo de San Jacinto fue señalado por 19 personas (9 %) como zona que genera retrasos en el tiempo de viaje, esta zona se encuentra en el subtramo 13 el cual tiene el 20.4 % de su área ocupada por equipamiento urbano y que se incrementó 1.6 veces con relación al año 2006.

Finalmente, 5 personas (3 %) señalaron el hundimiento de la aldea Apantes como una zona de retraso en el tiempo de viaje. Este hundimiento se encuentra en el kilómetro 217, ubicado en el subtramo 2 que a pesar de tener únicamente el 2.66 % de área ocupada por equipamiento urbano requiere un tiempo promedio de 5 minutos para ser cruzado debido a los trabajos de reparación.

Es importante resaltar que la aldea de San Esteban, área ubicada en el subtramo 16, no fue señalada por ningún usuario a pesar de que más del 50 % de su área está ocupada por equipamiento urbano.

3.5. Índice de ocupación de equipamiento urbano

Luego de relacionar el área ocupada por clase de equipamiento urbano con el tiempo de recorrido de cada subtramo, se encontró que la clase con mayor peso ponderado es la zona residencial con un 44.55, este peso ponderado es significativamente superior a la siguiente clase que es finca o industria con 13.08, seguida de 12.09 correspondiente a áreas de servicio. En otras palabras, esto quiere decir que la instalación de zonas residenciales es la clase que genera mayor impacto en el tiempo de recorrido en un tramo vial.

De acuerdo con los resultados, la clase que genera menor impacto en el tiempo de viaje es la infraestructura vial que hace referencia a túmulos, pasarelas y reductores de velocidad; sin embargo, esto se explica tomando en cuenta que estos elementos ocupan un área baja con relación al resto de clases, por tanto, no es práctico medirlos a través de este índice, siendo necesario medir su impacto utilizando otro método.

La siguiente clase con menor impacto en el tiempo de viaje es área sin equipamiento urbano que corresponde a terrenos baldíos o terrenos aplanados y nivelados, lo interesante de esta clase es que tiene potencial para convertirse en cualquier otra clase en un futuro cercano que puede impactar al tiempo de viaje.

Con la información de peso ponderado, se calculó el índice de influencia según tipo de equipamiento urbano, de acuerdo con los resultados de este

estudio se asignaron las siguientes categorías: bajo, medio y alto utilizando los percentiles 50 y 70 de los datos de cada variable.

El subtramo 1, tiene un porcentaje de área ocupada media y un tiempo de recorrido alto; sin embargo, el índice se encuentra en la categoría baja. Cabe destacar que este subtramo es el ingreso a la ciudad de Esquipulas, además de ser una zona donde la carretera tiene muchas curvas, lo cual influye en el tiempo de viaje y por tanto el tiempo de recorrido es alto.

En el subtramo 2, el índice se encuentra en la categoría baja en concordancia con el bajo porcentaje del área ocupada por equipamiento urbano; sin embargo, el tiempo se encuentra en alto, esto es debido que en esta zona se encuentra un hundimiento que repercute directamente en el tiempo de viaje, por tanto, este caso evidencia que otros factores pueden estar afectando en el tiempo de viaje.

Para el caso de los subtramos del 3 al 11 y el 16, las dos variables están en la misma categoría que el índice, lo que indica que en estos subtramos el índice sí corresponde.

En el subtramo 12, el porcentaje de área ocupada por equipamiento urbano es bajo, pero el tiempo esta categorizado como medio, esto indica que hay otro factor que está impactando al tiempo por ejemplo la geometría de la carretera o el ingreso próximo a centros poblados como sería el pueblo de San Jacinto.

Los subtramos 13 y 15, tienen alto el porcentaje de equipamiento urbano, pero bajo el tiempo de recorrido y el índice esta categorizado como medio, esto indica que el equipamiento urbano en este tramo ejerce un impacto medio en la

zona en concordancia con los valores de las variables. Caso similar para el subtramo 14, que tiene la ocupación de equipamiento urbano categorizada como media, al igual que el índice; cabe destacar que para en estos subtramos el índice de sinuosidad es cercano a uno lo que implica que la carretera tiende a ser recta, esto facilita la conducción y puede influir en que el tiempo de viaje sea menor. Caso similar para el subtramo 14, donde la ocupación de equipamiento urbano es media y el tiempo bajo.

Para una mejor comprensión de la relación entre la variable de ocupación de equipamiento urbano y el tiempo de recorrido, se muestra la representación gráfica en la figura 27, donde se establece una conexión mediante una función lineal, cuyo coeficiente de determinación es 0.53, lo cual evidencia que el modelo de regresión lineal ofrece una explicación sustancial de los datos; sin embargo, aún persiste una porción significativa de la variación que no es abordada por el modelo. Esta porción, puede deberse a factores no considerados como la topografía del terreno, la geometría de la carretera, así como fallas en la misma.

CONCLUSIONES

1. Se caracterizó y clasificó el equipamiento urbano ubicado dentro del área de estudio, obteniéndose que 71.62 hectáreas están ocupadas por equipamiento urbano, lo cual representa el triple del área ocupada en el año 2006; las clases predominantes son: zona residencial con el 46 %, áreas de servicio con el 12.4 % y fincas o industria con el 11.8 %.
2. A través de la recopilación de tiempos de viaje del servicio Google Maps se determinó el tiempo promedio de viaje en el área de estudio, resultando en 58 minutos en la dirección Esquipulas-Cruce de Ipala y 62 minutos en la dirección contraria. Esta información se comparó con los resultados obtenidos a través de encuestas realizadas a usuarios de la carretera CA-10, de los cuales el 41% tarda más de 51 minutos en llegar de Esquipulas al cruce de Ipala, mientras que en la dirección contraria el porcentaje asciende al 45 %, lo cual complementa y confirma los resultados obtenidos a partir del servicio de Google Maps.
3. A partir del análisis multicriterio en su forma rateo se estableció una relación geoespacial entre el tiempo de viaje y la clase de equipamiento urbano. Se creó el índice de influencia según clase de equipamiento urbano. Para el caso específico del tramo de estudio se identificó que cuando el índice es superior a 0.05 el equipamiento urbano tiene un alto impacto en el tiempo de viaje, si se encuentra entre 0.02 y 0.05 tiene impacto medio y si es menor a 0.02 el impacto es bajo. Agregado a lo anterior se identificó que las clases que más aportan al tiempo de recorrido

es la zona residencial, con un peso ponderado de 45 %, seguida de finca o industria con 13 % y áreas de servicio con 12 %.

4. Con base en la correlación de las variables de ocupación por equipamiento urbano y tiempo de viaje, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.53 que es un ajuste moderado, por tanto si bien la presencia de equipamiento urbano en carreteras sí influye en el tiempo de viaje, hay otros factores que también influyen en el tiempo; por tanto, para tener un modelo más exacto es necesario tomar en cuenta otros factores que podrían ser: la geometría de la carretera, la topografía, condición del pavimento, eventos geológicos, retenes policiales o de monitoreo, entre otros.

RECOMENDACIONES

1. Que las autoridades municipales, departamentales y del Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda regulen de manera efectiva el uso del suelo en el área de estudio para evitar que continúe la expansión urbana, para ello es importante incluir estas zonas dentro de planes de ordenamiento territorial y planes de desarrollo municipales y departamentales con el fin de garantizar un crecimiento urbano planificado y sostenible; así también, es necesaria la promoción y aprobación de una ley que proteja el derecho de vía de las carreteras para garantizar el funcionamiento eficiente de las mismas.
2. Que el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda realice un estudio para evaluar la veracidad y confiabilidad de los valores ofrecidos por los servicios y sistemas de navegación tales como Waze y Google Maps, con el fin de que estos datos puedan ser utilizados para crear una base de datos de tiempos de recorrido de las carreteras guatemaltecas que pueda ser actualizada de forma frecuente.
3. Que el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda, las municipalidades o centros de investigación pongan a prueba el índice determinado en este estudio en otras zonas carreteras para validar su eficacia y evaluar su potencial para ser utilizado como herramienta en la planificación y gestión del transporte en el país, ya que esto permitiría mejorar la precisión de las evaluaciones y apoyar la toma de decisiones informadas en la planificación del transporte a nivel nacional.

4. Que el Centro de Estudios Urbanos y Regionales de la Universidad San Carlos de Guatemala u otros centros de investigación, realicen estudios complementarios para determinar factores que influyen en el tiempo de viaje de las carreteras, para así tener un modelo que permita realizar mejores análisis sobre el tiempo de viaje en las carreteras.

REFERENCIAS

- Álvarez, G. B. (2017). Morfología en las ciudades medias mexicanas. *Región y Sociedad*, (68), 154-191. <https://bit.ly/3OeB5bZ>
- Banzat, J. (2015). Proceso de transformación territorial en las periferias urbanas en Olivera, G. *La urbanización social y privada del tejido: ensayos sobre la dualidad del desarrollo urbano en México*. Cuernavaca, México. <http://www.libros.unam.mx/digital/V9/44.pdf>
- Barreno, R. (4 de junio de 2022). Puente Petapilla: habilitan un carril en kilómetro 164 y ya hay paso entre Chiquimula y Zacapa. *Prensa Libre*. <https://bit.ly/41oeNHp>
- Barrientos, M. (8 de junio de 2022). Colapsa de nuevo el paso provisional de Zacapa a Chiquimula. *Prensa Libre*. <https://bit.ly/3VSp65F>
- Camacho, A. (29 de septiembre de 2021). Conred verifica daños en tramo carretero hacia Esquipulas. *Agencia Nacional de Noticias*. <https://agn.gt/conred-verifica-danos-en-tramo-carretero-hacia-esquipulas/>
- Centro de Estudios Territoriales y Municipalidad de Guarne. (2014). *Revisión y ajuste plan básico de ordenamiento territorial municipio de Guarne*. <https://bit.ly/42C29Wc>

Contraloría General de Cuentas. (2002). *Código Municipal*.
<https://www.contraloria.gob.gt/wp-content/uploads/2018/02/12-CODIGO-MUNICIPAL.pdf>

Chuvieco, E. 1995. *Fundamentos de Teledetección*. Segunda edición. Unigrá,
S.A. España.

Dirección General de Caminos. (2022). *Kilometraje*.
<https://caminos.gob.gt/kilometrajes.html>

Dmuchowsky, J. y Velázquez, M. (2016). La movilidad trasversal en La Región Metropolitana De Buenos Aires: los casos de los corredores radiales sur, oeste y sudoeste. *Revista Mobilias II*, (2), 59-75. <https://bit.ly/3ljxpqi>

Escobar, D. y Urazá, C. (2014). Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional. *Tecnura*, 18, 241-254.
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.SE1.a18>

Etxebarria, U. (2001). Del progreso científico al desarrollo tecnológico, del desarrollo tecnológico al progreso científico. *Argumentos de la razón*, (4), 83-116. http://institucional.us.es/revistas/argumentos/4/art_3.pdf

Fundesa. (2017). *¡Vamos a la obra!: infraestructura para el desarrollo*.
https://www.fundesa.org.gt/content/files/c_civica/enade2017/ENADE_2017 - MEDIA KIT.pdf

Hossain, M. (2018). Crowdsourced Indoor Mapping en CONESA, J. *Geographical and Fingerprinting Data to Create Systems for Indoor Positioning and Indoor/Outdoor Navigation*. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04606-5>

Instituto Nacional de Estadística. (2018). *XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda*.

Karagulian, F., Messina, G., Valenti, G., Liberto, C. y Carapelluci, F. (2021) A Simplified Map-Matching Algorithm for Floating Car Data. En Barolli, L., Woungang, I., Enokido, T. (eds) *Advanced Information Networking and Applications. AINA 2021 Lecture Notes en Networks and Systems*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75078-7_70

Liberali, A. M. (2016). La distancia geográfica de las capitales argentinas para el transporte de pasajeros. *Revista Mobilitas II*, (2), 18-26. <https://bit.ly/3ljxpgj>

Mehta, H., Kanani, P., Lande, P. (2019). Google Maps. *International Journal of Computer Applications*, 178(8), 41-46. https://www.researchgate.net/publication/333117435_Google_Maps

Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente. (1994). *Áreas de servicio: orden circular 320/94 – C y E*. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1510200.pdf

Montoya, J. (2014). *Modelo de simulación logístico para transporte de carga terrestre en un corredor vial de la Ciudad De Medellín*. [Tesis de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Archivo digital. <https://bit.ly/3mxd1S4>

Morales, J., Flacke, J. y Zevenbergen, J. (2019). Modelling residential land values using geographic and geometric accessibility in Guatemala City. *Urban Analytics and City Science*, 46(4), 751-776. DOI: 10.1177/2399808317726332

- Navarro, M. y Herrera, J. C. (2013). *Uso de tiempos de viaje en la estimación de indicadores de congestión*. Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 16. <https://bit.ly/3DIYRK7>
- Ornés, S. (2009). El urbanismo, la planificación urbana y el ordenamiento territorial desde la perspectiva del derecho urbanístico venezolano. *Revista de ciencias políticas Politeia*, 32(42), 197-225. <https://www.redalyc.org/pdf/1700/170014942008.pdf>
- Peláez, R. M. (2017). *Infraestructura vial en ciudad de Guatemala*. Universidad San Carlos de Guatemala, Centro de Estudios Urbanos y Regionales.
- Peláez, R. M. (2019). Las carreteras de 1944-1954: un símbolo de liberación. *Revista de Análisis de la Realidad Nacional*, 8(172):27-38. <https://bit.ly/35cS9ed>
- Pérez, A. (2011). *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática*. Editorial UOC. <https://bit.ly/2TNeyZl>
- Pronacom, BID, CIV, Dirección General de Caminos. (2018). *Reformulación y actualización del Plan de Desarrollo Vial 2018-2032*. <https://bit.ly/41pQwRs>
- Ramírez, H. I. (2013). *Restitución fotogramétrica a partir de fotografía aérea de pequeño formato* [tesis de maestría, Centro de investigación científica y educación superior de ensenada]. Archivo digital. <https://bit.ly/3sexWgo>
- Rozas, P. Sánchez, R. (2004). *Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual*. CEPAL. <https://bit.ly/3BkJVJO>

- Sánchez, S., Bedoya, F., Calatayud, A. (2021). Understanding the Effect of Traffic Congestion on Accidents Using Big Data. *Sustainability*, 13(13), 7500. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/13/7500>
- SIECA, PCGIR, CEPREDENAC. (2011). *Manual centroamericano de normas para el diseño geométrico de carreteras*. Tercera edición. <https://intercoonecta.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/Manual%20Centroamericano%20de%20normas%20para%20el%20dise%C3%B1o%20geométrico%20de%20carreteras%202011.pdf>
- Sobrino, J. (2000). *Teledetección*. Servicio de Publicaciones. Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8). <https://bit.ly/3JHn1Cn>
- Suárez, H., Verano, D., García, A. (2016). La movilidad urbana sostenible y su incidencia en el desarrollo turístico. *Gestión y ambiente*, 19(1):48-62. <https://bit.ly/3ulxEpc>
- Tagliari, V. (2017). Un análisis de sintaxis espacial de la estructura de santa fe. *Encuentro de Jóvenes Investigadores*. <https://goo.su/ot6Gu>
- Waze. (2023). *About [Aplicación móvil]*. <https://www.waze.com/es/about/>
- Zhu, AX., Zaho, FH., Liang, P. y Qin, CZ. (2020). Next generation of GIS: must be easy. *Anal of GIS*, 71-86. <https://bit.ly/3jgC0Yc>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Legislación sobre el derecho de vía en Guatemala y otros países

País	Ley/ código / reglamento	Nombre de la zona en la que no se puede construir	Distancia mínima a la que se puede construir en carreteras internacionales o de 1ra. categoría
Guatemala	Código Municipal (artículo 146)		40 metros del centro de la vía.
	Reglamento sobre el Derecho de Vía de los Caminos Públicos y su Relación con los Predios que Atraviesa (artículo 3 y 5)	Derecho de vía	12.50 metros desde el centro de la vía.
Nicaragua	Ley de Derecho de Vía de Nicaragua (artículo 2)	Derecho de vía	20 metros del centro de la vía.
Honduras	Ley de Vías de Comunicación de Honduras (artículo 14 y 16)	Derecho de vía y faja de reserva	15 metros desde el borde exterior de la vía + 5 metros de faja de reserva.
El Salvador	Ley de Carreteras y Caminos Vecinales (artículo 15)	Zona de retiro: comprende el límite de la propiedad privada frente a la vía pública y la línea de construcción	No definido.
México	Reglamento Para el Uso y Aprovechamiento del Derecho de Vía de Carreteras Estatales y Zonas Laterales (artículo 6, 8 y 9)	Derecho de vía	20 metros a partir del eje central.

Continuación del Apéndice 1.

País	Ley/ código / reglamento	Nombre de la zona en la que no se puede construir	Distancia mínima a la que se puede construir en carreteras internacionales o de 1ra. categoría
Colombia	Ley 1228 de 2028 (artículo 2, 6 y 7)	Faja mínima de retiro obligatorio o áreas de exclusión	60 metros desde el eje central.
España**	Ley de Carreteras (artículo 33)	Límite de edificación	25 metros a partir del borde exterior de la carretera medido horizontal y perpendicularmente.

* Parador: instalaciones y construcciones adyacentes al derecho de vía de una carretera estatal en las que se proporciona alojamiento, alimentación, sanitarios, servicios a vehículos y comunicaciones o cualquier otro similar a estos; también denominados servicios conexos o auxiliares.

**En España se considera como vías de primera categoría a las autopistas o autovías, pero debido a que no corresponden al tipo de carretera de la CA-10 se consideró la segunda categoría que son carreteras convencionales y multicarril.

Nota. Ley código o reglamento que regula el derecho de vía en diferentes países. Elaboración propia a partir de Código Municipal (2002), Reglamento sobre el Derecho de Vía de los Caminos Públicos y su Relación con los Predios que Atraviesa (1942), Ley de Derecho de Vía de Nicaragua (1952), Ley de Vías de Comunicación de Honduras (1958), Ley de Carreteras y Caminos Vecinales (1969), Reglamento Para el Uso y Aprovechamiento del Derecho de Vía de Carreteras Estatales y Zonas Laterales (1999), Ley 1228 de 2028 (2008) y Ley de Carreteras (2015), consultado el 25 de mayo de 2022. De dominio público.

Apéndice 2.

Clases de equipamiento urbano

Categorías propuestas	Subdivisión
Zona de administración pública	Colegios/escuelas
	Centros comunales/culturales
	Institución de gobierno
	cementerios
	Iglesias
	Servicio de salud
Áreas de servicio	Tiendas de conveniencia
	Restaurantes/comedores
	Farmacias
	Hotel
	Gasolinera
	Terminal de transporte
	Taller mecánico/pinchazo
Zona comercial	Mercado
	Plaza comercial/centro comercial
	Agroservicios
	Boutique/venta de ropa, zapatos, entre otros.
	Salón de belleza
	ferretería
	Venta de autos
	Viveros
	Mirador
Zona recreativa	Canchas de fútbol/básquet
	parque recreativo
Zona residencial	Vivienda particular
	Lotificación
	Condominio
	Vivienda en construcción
Zona en construcción	Terreno aplanado y nivelado
	Zona en construcción
Fincas o industria	Predios ganaderos
	Molienda
	Establo
	fincas agrícolas
	Industrias

Continuación del Apéndice 2.

Categorías propuestas	Subdivisión
Zona de almacenamiento y depósito de vehículos	depósitos de transporte público o pesado
	parqueo
	Bodega
Áreas sin equipamiento urbano	Terreno con vegetación
	Terreno baldío

Nota. Clases de equipamiento urbano utilizadas para clasificar las edificaciones. Elaboración propia con base en Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente (1994). *Áreas de servicio: orden circular 320/94 – C y E.* (https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1510200.pdf), consultado el 22 de mayo de 2022. De dominio público.

Apéndice 3.

Ficha de campo para recopilar las clases de equipamiento urbano en campo

Estimación de área ocupada por equipamiento urbano

Contenido de descripción de la encuesta

Fecha de toma de muestra

11/5/2023

Ubicación de la edificación*

Ubique la edificación que esta evaluando en el mapa.



Número de predio

Proporcione el número de predio de acuerdo con los datos del mapa. En caso no tenga numeración dejar en blanco.

Continuación del Apéndice 3.

Clase*

Seleccione la clase de equipamiento urbano al que pertenece la edificación

Zona de administración pública

Área de servicio

Zona comercial

Zona recreativa

Acceso a otra carretera o camino

Zona residencial

Finca o industria

Túmulo/reductor de velocidad/bache

Subdivisión de uso*

Proporcione el uso exacto de la edificación. Por ejemplo: gasolinera, escuela, tienda de conveniencia

Continuación del Apéndice 3.

Observaciones

Colocar aquí cualquier dato que se considere relevante. Por ejemplo: hay varios usos en un mismo edificio.

(opcional) Fotografía de la edificación

En caso lo considere necesario, suba una fotografía de la edificación

Enviar

Nota. Ficha de campo para registrar las clases de equipamiento urbano de cada edificación.
Elaboración propia, realizado con Survey123

Apéndice 4.

Encuesta extendida a los usuarios de la carretera CA-10

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INSTALACIÓN DE EQUIPAMIENTO URBANO EN LA EFICIENCIA DE LA CARRETERA CA-10 EN EL TRAMO ESQUIPULAS-CRUCES DE IPALA

El funcionamiento y eficiencia de las carreteras guatemaltecas, ha variado a lo largo de los años siendo el tiempo de viaje, una de las variaciones más evidentes; de igual forma, se ha incrementado el equipamiento urbano en las zonas aledañas a la carretera derivado de la expansión urbana, así como también al incremento de zonas comerciales y áreas de servicio.

En función de lo anterior se ha propuesto una investigación para determinar si las dos variables indicadas están relacionadas. Para ello se ha escogido como tramo de estudio 48 kilómetros de la carretera CA-10 que van desde el ingreso a la ciudad de Esquipulas (Gasolinera Puma) al Cruce que conduce al municipio de Ipala (Gasolinera Shell).

Para llevar a cabo la investigación, es necesario contar con información sobre el tiempo de recorrido de usuarios de la carretera, por lo que agradeceré si me ayudas respondiendo esta pequeña encuesta.

Continuación del Apéndice 4.

Área de estudio



1. ¿Con qué frecuencia transita por la carretera CA-10 específicamente en el tramo Esquipulas - Cruce de Ipala? *

Marca solo un óvalo.

- Diario
 Al menos una vez por semana
 Al menos una vez al mes
 Eventualmente

2. ¿En qué tipo de vehículo viaja? *

Marca solo un óvalo.

- Automóvil
 Motocicleta
 Autobus
 Camión
 Trailer

3. ¿Cuál es el tiempo promedio de traslado para llegar de Esquipulas (desde la gasolinera puma) hasta el cruce de Ipala (gasolinera Shell)? *

Marca solo un óvalo.

- 20-30 minutos
 31-40 minutos
 41-50 minutos
 51-60 minutos
 61 minutos o más

Continuación del Apéndice 4.

4. ¿Cuál es el tiempo promedio de traslado para llegar del cruce de Ipala (gasolinera Shell) hasta Esquipulas (gasolinera puma)? *

Marca solo un óvalo.

- 20-30 minutos
 31-40 minutos
 41-50 minutos
 51-60 minutos
 61 minutos o más

5. Considera que en los últimos años, el tiempo de recorrido en el tramo indicado: *

Marca solo un óvalo.

- Ha incrementado
 Se mantiene igual
 Ha disminuido

6. ¿Qué zonas considera que han generado mayor variedad en el tiempo de recorrido? *



Selecciona todas las que correspondan.

1. Ingreso a la ciudad de Esquipulas
 2. Ciudad de Quezaltepeque
 3. Ciudad de San Jacinto
 4. Aldea Santa Elena
 5. Aldea Vado Hondo
 Otro: _____

Nota. Encuesta extendida a los usuarios de la carretera CA-10. Elaboración propia, realizado con Google Forms.