

EL CONGESTIONAMIENTO VEHICULAR, ANÁLISIS Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN: INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA ENTRE AVENIDAS AMÉRICA Y REALES TAMARINDOS, PORTOVIEJO, ECUADOR

VEHICULAR CONGESTION, ANALYSIS AND SOLUTION PROPOSAL: TRAFFIC LIGHTED INTERSECTION BETWEEN AMERICA AND REALES TAMARINDOS AVENUES, PORTOVIEJO, ECUADOR

Jorge Gómez¹; Daniel Delgado²

¹Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador. Email: jgomez9957@utm.edu.ec

²Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador. Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Avenida José María Urbina, Portoviejo, Ecuador. Email: daniel.delgado@utm.edu.ec

Resumen

Los problemas de circulación vehicular se mantienen en constante crecimiento en muchas ciudades del mundo, especialmente en Latinoamérica. La presente investigación tuvo como objetivo analizar el congestionamiento vehicular producido en la intersección semaforizada de las avenidas América y Reales Tamarindos de la ciudad de Portoviejo, Manabí-Ecuador, mediante la determinación de su nivel de servicio para identificar el grado de confort producido en sus usuarios. El proceso metodológico consistió en aforar los distintos medios de movilización en intervalos de 15 minutos y la recolección de datos geométricos de las vías que conforman la intersección, para posteriormente determinar el flujo de saturación y las demoras por carril representadas en seg/veh y clasificarla según el nivel de servicio obtenido, aplicando el procedimiento propuesto por el HCM. Mediante el análisis de resultados se generaron medidas específicas para mejorar la situación actual de la zona estudiada. Los resultados indicaron una demora general de 23.97 seg/veh, que la categorizaron con un nivel de servicio C, localizando los principales problemas en los carriles “derecho” producto de los estacionamientos permitidos.

Palabras clave: Congestión vehicular, intersección semaforizada, nivel de servicio, flujo de saturación, demoras.

Abstract

Traffic problems are constantly growing in many cities around the world, especially in Latin America. The objective of this research was to analyze the traffic congestion produced at the signalized intersection of the

avenues America and Reales Tamarindos in the city of Portoviejo, Manabí-Ecuador, by determining its level of service to identify the degree of comfort produced by its users. The methodological process consisted of counting the different means of mobilization in 15 minutes intervals and collecting geometric data of the roads that make up the intersection, to later determine the saturation flow and delays per lane represented in sec/veh and classify it according to the level of service obtained, applying the procedure proposed by HCM. By analyzing the results, specific measures were generated to improve the current situation of the studied area. The results indicated a general delay of 23.97 sec/veh, which was categorized with a C service level, locating the main problems in the "right" lanes because of the permitted parking spaces.

***Keywords:** Traffic congestion, signalized intersection, service level, saturation flow, delays.*

Introducción

La movilidad vial constituye un eje fundamental en el desarrollo de las ciudades y el bienestar social de sus integrantes (Jiménez & Salas, 2017).

Con la aparición del vehículo motorizado (finales del siglo XIX), aumentó la necesidad de implementar mayores estructuras viales para mejorar el flujo vehicular, generando un aumento acelerado y sin control del parque automotor (Aznar, 1998).

A nivel mundial, muchas ciudades se enfrentan a graves problemas de transporte urbano, producto del constante crecimiento de vehículos en circulación. Un ejemplo claro se observa en la Zona Metropolitana del Valle de México, que está conformada por el Distrito Federal y 28 municipios adicionales, donde el número de vehículos rebasó más de 3'500.000 unidades en el año 2000 (Lozano et al., 2003).

En adición al elevado número de vehículos motorizados, el crecimiento urbanístico inadecuado en gran parte de Latinoamérica en donde no consideran el desarrollo sostenible de sus ciudades ha incentivado a la dependencia del vehículo privado como principal medio de movilización, debido a las grandes distancias territoriales que se deben transitar para llegar a los distintos puntos de interés (Delgado et. al, 2020, 2021), generando impactos negativos en la red vial, como la congestión vehicular y el aumento de siniestros de tránsito (Dalkmann & Sakamoto, 2011).

Las intersecciones en las vías son áreas diseñadas para que los vehículos puedan circular en diferentes sentidos, por lo que generalmente están sujetas a políticas de control de tránsito,

como semáforos, señalizaciones, entre otros (Peñabaena-Niebles 2015). Particularmente, las intersecciones semaforizadas se implementan en zonas donde los movimientos conflictivos entre vehículos, peatones y ciclistas podrían generar accidentes, demoras elevadas o problemas de confort durante su circulación, como es el caso de la zona de estudio.

Para determinar el grado de satisfacción y confort que una intersección semaforizada genera en el usuario, se emplean los niveles de servicio, definidos a través de demoras expresadas en vehículos/segundos (HCM, 2000).

Portoviejo, al ser la capital de la provincia de Manabí, tiene una población aproximada de 300.000 habitantes (INEC, 2010), por lo que experimenta uno de los problemas más frecuentes de las ciudades con una elevada actividad comercial y burocrática, el congestionamiento vehicular (Gutiérrez et. al, 2020; Castillo et. al, 2020).

La carencia de estudios en intersecciones semaforizadas de gran relevancia dentro de la ciudad de Portoviejo limita la toma de decisiones para mejorar su movilidad urbana, resaltando la importancia de conocer el grado de confort que este tipo de segmento vial representa a los usuarios.

Por este motivo, el objetivo de la presente investigación será analizar el congestionamiento vehicular en la intersección semaforizada de las avenidas América y Reales Tamarindos en la ciudad de Portoviejo, Ecuador, mediante la determinación del nivel de servicio, permitiendo identificar los principales factores que influyen en esta problemática y proponer soluciones mediante medidas enfocadas en la obtención de una movilidad urbana sostenible.

Metodología

Se implementaron aforos vehiculares distribuidos en 3 días de la semana (lunes, miércoles y viernes) en fechas que no tuvieron ninguna incidencia de eventos extraordinarios que puedan sesgar los resultados de la investigación, durante las 07h00 a 19h00 en intervalos de 15 minutos y clasificados en bicicletas, motos, vehículos livianos, camiones y buses, respaldados en la metodología propuesta por Casanova & Delgado (2015), Nasareno et. al, (2020) y Gutiérrez et. al (2020). Adicionalmente, los vehículos livianos se clasificaron en

placas con terminación par e impar para determinar el posible alcance de una medida a proponer.

Posteriormente, se obtuvieron las características geométricas de la intersección, mediante la medición de longitudes transversales y longitudinales, pendientes, número de carriles, identificación de zonas de estacionamientos, tipo de zona, paradas de buses, ciclos semafóricos en segundos, identificación de señalización de tránsito como zonas cebra y medidas complementarias, entre otras.

La información obtenida permitió calcular los parámetros necesarios para determinar el nivel de servicio de la intersección, los cuales se detallan a continuación:

Tasa de flujo

El cálculo del factor pico para calibrar el flujo de demanda se obtuvo de la ecuación 1, donde V_p es el caudal durante el período pico de 15 min (veh/h), V es el volumen horario (veh/h), PHF es el factor de hora pico (ecuación 2), V_{15} es el volumen máximo de 15 min durante la hora pico:

$$V_p = \frac{V}{PHF} \quad [1]$$

$$PHF = \frac{V}{4xV_{15}} \quad [2]$$

Módulo de saturación

Se obtuvo mediante la ecuación 3:

$$S = S_o N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb} \quad [3]$$

Donde S es la tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles sujeto (veh/h); S_o es el caudal de saturación de base por carril, generalmente 1.900 automóviles de pasajeros por hora por carril (pc/h/l); N es el número de carriles en el grupo de carriles; f_w es el factor de ajuste por ancho de carril; f_{HV} es el factor de ajuste para vehículos pesados en el flujo de tráfico; f_g es el factor de ajuste por pendiente de aproximación; f_p es el factor de ajuste para la existencia de un carril de estacionamiento y actividad de estacionamiento adyacente al grupo de carriles; f_{bb} es el factor de ajuste por efecto de bloqueo de los autobuses locales que paran dentro del área de intersección; f_a es el factor de ajuste por tipo de área; f_{LU} es el

factor de ajuste para la utilización del carril; f_{LT} es el factor de ajuste para giros a la izquierda en el grupo de carriles; f_{RT} es el factor de ajuste para giros a la derecha en el grupo de carriles; f_{LPb} es el factor de ajuste del peatón para los movimientos de giro a la izquierda; f_{RPb} es el factor de ajuste peatón-bicicleta para giros a la derecha.

Las fórmulas para calcular los componentes del flujo de saturación se detallan a continuación (Tabla 1):

Tabla 1

Ecuaciones complementarias para determinar la tasa de flujo de saturación (S) (adaptada de Loor et. al, 2021)

Ecuación	Simbología	Consideraciones	Ecuación N°
$f_w = 1 + \frac{(W-3.6)}{9}$	w= ancho de carril (m)	Si W > 4,8 m, se deben considerar dos carriles	[4]
$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(E_T - 1)}$	%HV= % de vehículos pesados en el volumen del carril	ET= 2 pc/HV	[5]
$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$	%G= % de la pendiente en grados	Valores negativos deben colocarse cuando la pendiente es cuesta abajo	[6]
$f_p = \frac{N-0.1-\frac{18Nm}{3600}}{N}$	N= número de carriles; Nm= número de maniobras de parqueo	Fp= 1 si no hay parqueaderos	[7]
$f_{bb} = \frac{N-\frac{14.4Nb}{3600}}{N}$	N= número de carriles; Nb= número de paradas de buses por hora		[8]
$f_{a(urbano)} = 0.90$			[9]
$f_{LU} = \frac{V_g}{(V_g1N)}$	vg=caudal demanda no ajustada para el carril (veh/h), vg1=caudal demanda no ajustada carril con mayor volumen (veh/h),N=número de carriles		[10]
$f_{RT} = 1 - (0.15)P_{RT}$	PRT=proporción de giros a la derecha	Ecuación para carril compartido (no exclusivo para giro a la derecha)	[11]
$f_{LT} = 1.00$		Valor 1 cuando el giro a la izquierda no está permitido	[12]
$f_{LPB} = 1 - P_{LT}(1 - A_{pbT})(1 - P_{LTA})$		Valor 1 cuando el giro a la izquierda no está permitido	[13]
$f_{RPb} = 1.0 - P_{RT}(1 - A_{pbT})(1 - P_{RTA})$		Valor 1 cuando el giro a la izquierda no está permitido	[14]

Las ecuaciones 13 y 14 requieren factores que se derivan del flujo de peatones y bicicletas dentro de la intersección, por lo cual fue necesario realizar el siguiente procedimiento (ecuaciones 15-1 y 15-2).

$$OCC_{pedg} = \frac{V_{pedg}}{2000} (V_{pedg} \leq 1000) \quad [15-1]$$

$$OCC_{pedg} = 0.4 + \frac{V_{pedg}}{10000} (1000 < V_{pedg} \leq 5000) \quad [15-2]$$

Mediante estas ecuaciones (15-1 y 15-2) se determinó la ocupación de peatones promedio, que está condicionado por el volumen peatonal (V_{pedg}) y se calcula de la siguiente manera (ecuación 16):

$$V_{pedg} = V_{ped} * \left(\frac{C}{g_p}\right) \quad [16]$$

Donde C es el tiempo total del ciclo semafórico (s); G_p es el tiempo verde mínimo para los peatones (s) (ecuación 17-1 o 17-2, revisar condiciones).

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{S_p} + \left(0.81 \frac{N_{ped}}{W_E}\right) (W_E > 3.0m) \quad [17-1]$$

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{S_p} + (0.27 N_{ped}) (W_E \leq 3.0m) \quad [17-2]$$

Donde L es la longitud del paso de peatones (m), S_p es la velocidad media de los peatones (m/s), W_E es el ancho efectivo del paso de peatones (m), 3.2 es el tiempo (s) de puesta en marcha de peatones, N_{ped} es el número de peatones que cruzan durante un intervalo (p).

Se requirió además calcular los factores del transporte en bicicleta, iniciando con la ocupación de la bicicleta en la zona de conflicto, OCC_{bicg} (ecuación 18), donde V_{bicg} es el caudal de la bicicleta ajustado (ecuación 19), V_{bic} es el volumen de la bicicleta; C es la duración del ciclo del semáforo; g es la estimación del tiempo verde del semáforo:

$$OCC_{bicg} = 0.02 + V_{bicg}/2700 \quad [18]$$

$$V_{bicg} = V_{bic} \left(\frac{C}{g}\right) \quad [19]$$

Al contar con la información de peatones y ciclistas, es posible calcular su ocupación relevante (componentes en conjunto) dentro de la intersección bajo estudio mediante la siguiente ecuación (ecuación 20):

$$OCC_r = OCC_{pedg} + OCC_{bicg} - (OCC_{pedg} * OCC_{bicg}) \quad [20]$$

Los giros a la izquierda y derecha también influyen en las demoras dentro de las intersecciones, por lo que fue necesario adaptar los valores de la ecuación 20 mediante las siguientes ecuaciones (ecuaciones 21-1 y 21-2):

$$Apbt = 1 - OCC_r \text{ (Nrec=Ngiro)} \quad [21-1]$$

$$Apbt = 1 - 0.6 * OCC_r \text{ (Nrec>Ngiro)} \quad [21-2]$$

Donde Nrec es el número de carriles que cruzan las calles; Nturn es el número de carriles de giro.

Los factores obtenidos permiten completar las ecuaciones 13 y 14 (Tabla 1), considerando además que PRT y PLT son proporciones de giro a la derecha e izquierda respectivamente, mientras que PRTA y PLTA corresponde a la proporción de giros a la derecha e izquierda usando fase protegida, que no existen en la zona de estudio de la presente investigación.

Capacidad

Para determinar la capacidad del carril (veh/h) se aplicó la siguiente ecuación 22 ($g_i=g$):

$$C_l = S \frac{g_l}{c} \quad [22]$$

Radio de flujo

Los efectos producidos por la demanda y capacidad de la intersección (radio de flujo, X_i) se calculan mediante la siguiente ecuación 23 ($V_i=V_p$; $g_i=g$; $S_i=S$):

$$X_l = \frac{v_l c}{s_l g_l} \quad [23]$$

Demoras

Se consideraron 3 niveles de demoras (carril, punto de aproximación e intersección general).

La demora general dentro de la intersección (d), corresponde a la demora de control por vehículos (s/veh) y considera 3 demoras distintas que surgen dentro de toda intersección semaforizada (ecuación 24):

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad [24]$$

Donde d_1 es la demora de control uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh, ecuación 25); PF es el factor de ajuste de progresión de demora uniforme (considera efectos de la

progresión de la señal, ecuación 26); d_2 es la demora incremental que considera el efecto de las llegadas aleatorias y las colas de sobresaturación, ajustado según la duración del período de análisis y el tipo de control de señal (asume que no hay una cola inicial para el grupo de carriles al inicio del período de análisis, s/veh, ecuación 27); d_3 es el retraso de la cola inicial, representa el retraso de todos los vehículos en el período de análisis debido a la cola inicial al inicio del período de análisis (seg/veh). Para el presente estudio, se consideró un valor promedio de 1 seg/veh (d_3).

$$d_1 = \frac{0.5C(1-\frac{g}{C})^2}{1-\left[\min(1,X)\frac{g}{C}\right]} \quad [25]$$

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1-\left(\frac{g}{C}\right)} \quad [26]$$

Donde P es la proporción de vehículos que llegan en verde ($P= R_p * g/C$; R_p en tabla 2-3); f_{PA} es el factor que depende del tipo de llegada (tabla 2-3).

Tabla 2

Factores de ajuste basados en el tipo de arribo vehicular (HCM, 2010)

Factor	Tipo de arribo					
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5	AT 6
fPA	1,00	0,93	1,00	1,15	1,00	1,00
Rp	0,33	0,67	1,00	1,33	1,67	2,00

$$d_2 = 900T \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8kIx}{cT}} \right] \quad [27]$$

Donde T es la duración del período de análisis (h) (1/4 h); k es el factor de retardo incremental que depende de la configuración del controlador (intersecciones semaforizadas = 0.5); I es el factor de ajuste de filtrado/medición aguas arriba (ecuación 28); c es la capacidad del grupo de carriles (veh/h).

$$I = 1.0 - 0.91X_i^{2.68} \quad [28]$$

Tabla 3

Tipos de arribos a la intersección de acuerdo con el comportamiento del pelotón vehicular (HCM, 2010)

Tipos de arribos	Descripción
1	Pelotón denso que contiene más del 80 por ciento del volumen del grupo de carriles, llegando al inicio de la fase roja. Este AT es representativo de enlaces de red que pueden experimentar una calidad de progresión muy baja como resultado de condiciones como la optimización general de la señal de la red.
2	Pelotón moderadamente denso que llega a la mitad de la fase roja o pelotón disperso que contiene entre el 40 y el 80 por ciento del volumen del grupo de carriles y llega durante la fase roja. Este AT es representativo de una progresión desfavorable en calles de doble sentido.

3	Llegadas aleatorias en las que el pelotón principal contiene menos del 40 por ciento del volumen del grupo de carriles. Este AT es representativo de operaciones en intersecciones señalizadas aisladas y no interconectadas caracterizadas por pelotones muy dispersos. También se puede utilizar para representar una operación coordinada en la que los beneficios de la progresión son mínimos.
4	Pelotón moderadamente denso que llega a la mitad de la fase verde o pelotón disperso que contiene entre el 40 y el 80 por ciento del volumen del grupo de carriles y llega durante la fase verde. Este AT es representativo de una progresión favorable en una calle de doble sentido.
5	Pelotón denso a moderadamente denso que contiene más del 80 por ciento del volumen del grupo de carriles, llegando al inicio de la fase verde. Este AT es representativo de una calidad de progresión altamente favorable, que puede ocurrir en rutas con entradas de calles laterales bajas a moderadas y que reciben un tratamiento de alta prioridad en el plan de sincronización de señales.
6	Este tipo de llegada está reservado para una calidad de progresión excepcional en rutas con características de progresión casi ideales. Es representativo de pelotones muy densos que avanzan sobre una serie de intersecciones estrechamente espaciadas con entradas de calles laterales mínimas o insignificantes.

Este procedimiento se realizó para cada carril (8 en total, que corresponde a 2 por cada punto de aproximación), por lo que posteriormente se calcularon las demoras por cada punto de aproximación (DI, en seg/veh, 4 en total) mediante la siguiente ecuación (29):

$$d_l = \frac{\sum d_A V_A}{\sum V_A} \quad [29]$$

Donde d_A es la demora en el grupo de carril A; V_A es la tasa de flujo en el carril A (V_p).

Después de haber calculado la demora por punto de aproximación, se procedió a calcular la demora de la intersección en general, aplicando la ecuación 29.

Los resultados obtenidos (demoras en seg/veh) permitieron identificar los niveles de servicio, aplicando los criterios mostrados en la tabla 4:

Tabla 4

Nivel de servicio en intersección semaforizada mediante la demora por vehículo (HCM, 2010)

Nivel de servicio	Demora por vehículo (s/veh)
A	<10
B	>10-20
C	>20-35
D	>35-55

Se categorizaron los niveles de servicio para cada carril, punto de aproximación e intersección en general. Mediante esta clasificación se identificaron los principales problemas que inciden en el congestionamiento vehicular de la zona de estudio, permitiendo establecer medidas específicas que mejoren la movilidad en la intersección analizada.

Resultados y discusión

Los componentes geométricos de la intersección en estudio se determinan en la Figura 1:

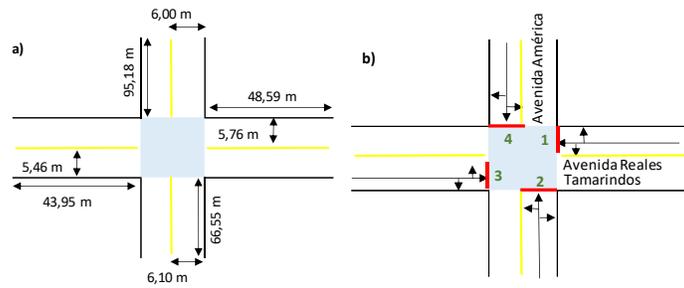


Figura 1

Datos geométricos, identificación de puntos de aproximación (a) y movimientos permitidos entre las Avenidas América y Reales Tamarindos (b).

Mediante la Figura 1a se pueden identificar 4 puntos de aproximación (representados de color rojo), los cuales se clasifican en dos carriles, izquierdo y derecho. Cada carril tiene permitido realizar los siguientes giros (Figura 2).

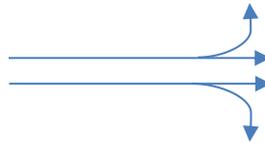


Figura 2

Determinación de grupos de carriles por puntos de aproximación.

Ambos carriles tienen permitido dos acciones: 1 giro dependiendo de su ubicación dentro del flujo vehicular (izquierda o derecha) y, la circulación frontal. A pesar de no existir señalética que permita invadir el carril adyacente, se observó que cierta cantidad de vehículos realizó este tipo de movimientos, por lo que este porcentaje ha sido considerado en sus ecuaciones correspondientes. En conjunto con los valores mostrados en la Figura 2, se determinó que la pendiente de la intersección en todos sus PA fue del 0%, encontrándose en un terreno completamente plano, siendo favorable para una mejor movilidad. Únicamente el PA 4 no tiene permitido estacionamientos en su carril derecho (en el sentido del flujo vehicular). No se identificó ninguna parada o estación de bus dentro de la zona de estudio.

La distribución semafórica correspondiente al tiempo en segundos comparte el rango total en ambas avenidas (73 seg), pero su distribución de accionar (verde, amarillo y rojo) tienen una pequeña variación, la cual se observa en la Figura 3:



Figura 3

Distribución de los ciclos semafóricos en la intersección de las Avenidas América y Reales Tamarindos

La distribución semafórica (Figura 3) permitió identificar una mayor circulación dentro de la Avenida América, debido al mayor tiempo de color verde que supone una mayor demanda.

Posteriormente, mediante el análisis del tráfico dentro de la intersección bajo estudio, se determinaron los siguientes resultados (Figura 4):

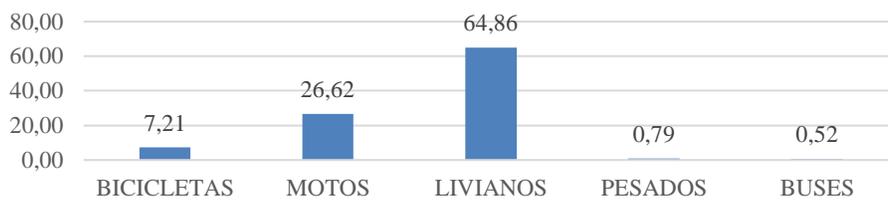


Figura 4

Composición del tránsito en la intersección por tipo de transporte.

La Figura 4 determina que el tipo de transporte que circula con mayor frecuencia dentro de la intersección es el vehículo liviano, con casi el 65% de su distribución total, mientras que los vehículos pesados y camiones, que en ecuaciones posteriores formarán el grupo único “pesados”, representó el 1.31% de la composición general.

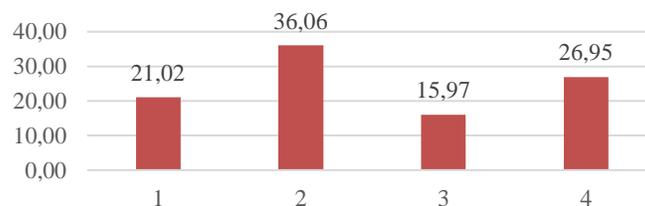


Figura 5

Distribución del transporte por PA (punto de aproximación)

El análisis de la Figura 5 determina que el PA de mayor relevancia dentro de la intersección en cuanto al flujo vehicular fue el 2, con el 36% de la distribución total del tránsito, mientras

que el segundo PA con mayor peso vehicular fue el 4, con casi el 27% de la distribución del tránsito, ambos pertenecientes a la Avenida América (62.92% para esta avenida), con lo que se puede corroborar lo demostrado mediante la distribución semafórica. Para complementar la información de vehículos pesados, el porcentaje de este tipo de transporte para cada PA se distribuyó de la siguiente manera (Figura 6):



Figura 6

Distribución porcentual de vehículos pesados por PA (incluyen pesados y buses)

La Figura 6 indica que el PA 4 es el que registró mayor porcentaje de circulación de vehículos pesados dentro de la zona de estudio, factor que incide directamente en el aumento de demoras, pero al ser porcentajes muy bajos su impacto podría no ser muy relevante, lo que se corroborará más adelante.

En cuanto al análisis adicional, la distribución por último dígito de placa vehicular, que consideró únicamente a los vehículos livianos (sin incluir motocicletas), determinó que el 59.3% de vehículos motorizados estuvieron dentro del grupo impar (Fig.6).

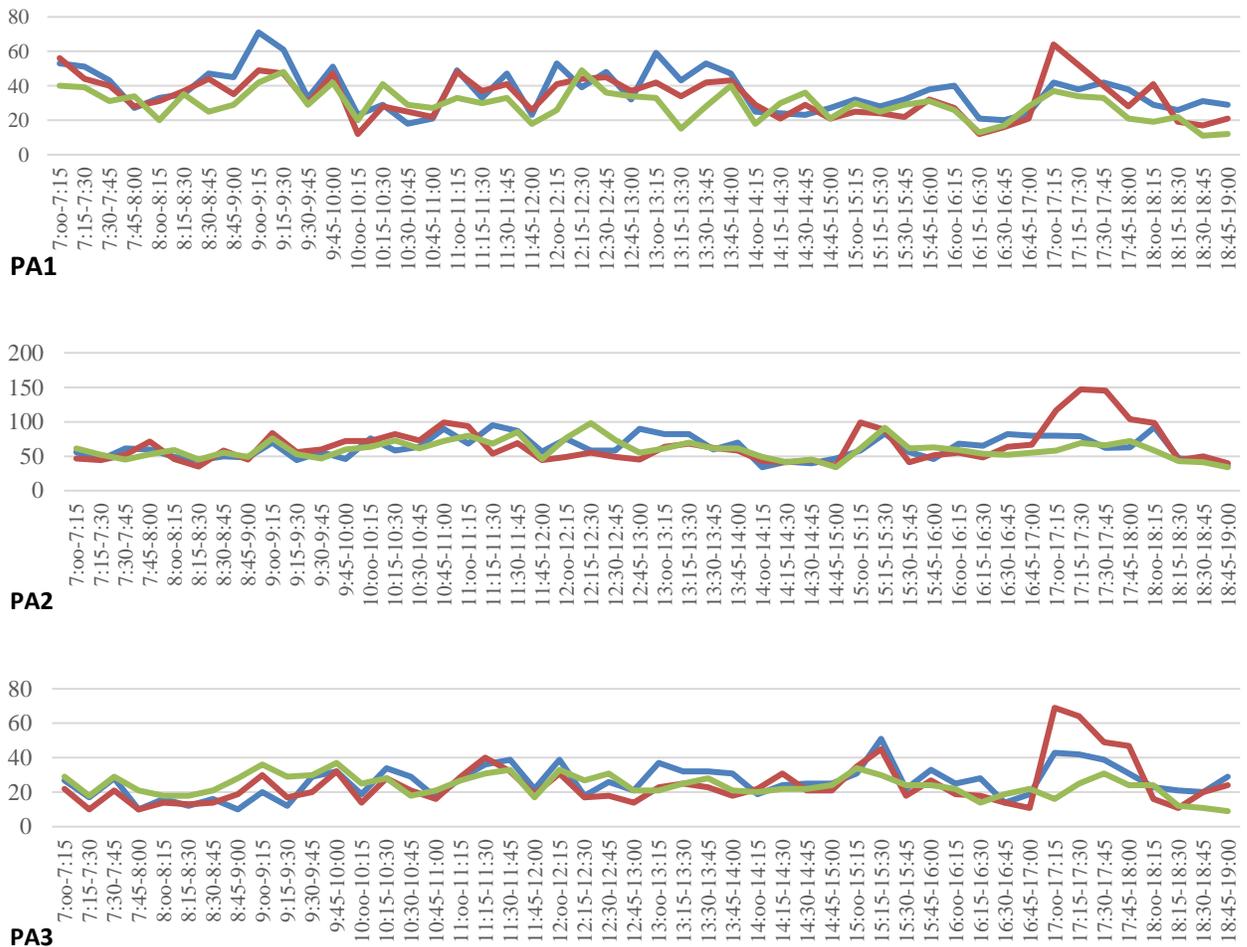


Figura 7

Distribución de vehículos livianos por último dígito de placas

Las horas pico, al ser uno de los componentes más importantes al momento de determinar el nivel de servicio y evaluar los problemas potenciales dentro de una intersección, se clasificaron por cada PA y se distribuyeron en intervalos de 15 minutos durante los 3 días de

estudio. Además, para representar correctamente el peso que cada tipo de vehículo motorizado representa en el tránsito vehicular, se transformaron los distintos tipos de vehículos a “livianos equivalentes”, aplicando los siguientes factores de conversión: 2 motocicletas = 1 vehículo liviano; 1 camión = 2 vehículos livianos; 1 bus = 2 vehículos livianos. Basados en esta conversión y para tratar un solo tipo de vehículo dentro de la intersección se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 8):



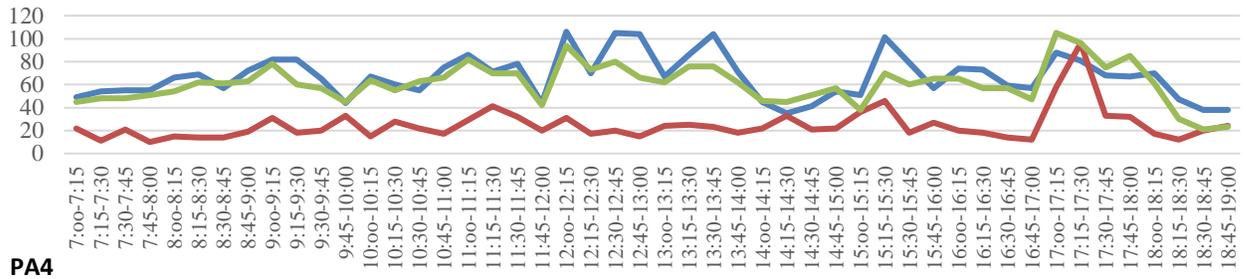


Figura 8

Distribución de vehículos livianos equivalentes en intervalos de 15 minutos para la identificación de horas pico. Eje “y” corresponde a frecuencia vehicular; eje “x” corresponde a intervalo de estudio

Mediante el análisis de la Figura 8 se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 5):

Tabla 5

Resumen de horas pico por carril (I= Izquierdo; D= Derecho) e intervalos de 15 minutos y 1 hora.

Detalle	PA 1		PA 2		PA 3		PA 4	
	I	D	I	D	I	D	I	D
H. pico / día	8:30-9:30/Lunes		17:00-18:00/Miércoles		17:00-18:00/Miércoles		17:00-18:00/Viernes	
V. Max 1	26	21	67	50	40	29	58	47
V. Max 2	25	20	84	63	37	27	53	43
V. Max 3	39	32	83	62	28	21	41	34
V. Max 4	34	27	59	45	27	20	47	38
V. hora pico	124	100	293	220	132	97	199	162
Total PA	224		513		259		361	

Los resultados mostrados en la Tabla 5 se distribuyen cada 15 minutos y se representan por V.max (volumen máximo) para cada intervalo. Se puede observar que el PA2 es el que representa la mayor cantidad de vehículos en las horas pico y que en cada PA los intervalos varían en hora y día (únicamente existe similitud de horarios pico entre PA2 y PA3). Además, los carriles izquierdos de todos los PAs son los que mantienen una mayor frecuencia de circulación. Estos resultados demuestran que la dinámica del flujo vehicular no será la misma en los puntos de aproximación a pesar de encontrarse dentro de una misma intersección, debido a que las actividades cotidianas y equipamiento urbano generan una atracción de usuarios en distintos momentos de la semana y sus ubicaciones varían dentro de toda la ciudad.

Con estos resultados se han obtenido todos los componentes necesarios para el análisis del tránsito motorizado, pero hacen falta determinar los resultados de los tipos de movilización a pie y en bicicleta. Estos resultados se detallan a continuación (Tabla 6):

Tabla 6

Aforo peatonal y ciclista en la intersección estudiada en 15 minutos (obtenido en sus horas pico)

Detalle	PA 1		PA 2		PA 3		PA 4	
	I	D	I	D	I	D	I	D
Peatón	592		407		210		346	
Bicicleta	4	7	5	11	4	9	7	13

Con estos resultados (Tabla 6) se procede a calcular todos los componentes indicados en las 29 ecuaciones descritas en la presente investigación, mediante la aplicación de la metodología del HCM (2010) y se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7

Resultados de los componentes para determinar el nivel de servicio en intersecciones semaforizadas

Parámetros	P. A. 1		P. A. 2		P. A. 3		P. A. 4		Detalle
	Izquierdo	Derecho	Izquierdo	Derecho	Izquierdo	Derecho	Izquierdo	Derecho	
PHF	0,79	0,78	0,87	0,87	0,83	0,84	0,59	0,64	
Vp	156,00	128,00	336,00	252,00	160,00	116,00	336,00	252,00	
So	1900,00	1900,00	1900,00	1900,00	1900,00	1900,00	1900,00	1900,00	
N	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
fW	0,92	0,92	0,94	0,94	0,90	0,90	0,93	0,93	
fHV	0,99	0,99	0,99	0,00	0,99	0,99	0,98	0,98	
fG	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
fP	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	
fBb	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
fA	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
fLU	1,00	0,81	1,00	0,75	0,94	0,76	1,00	0,81	
fRT	0,99	0,91	0,99	0,96	0,99	0,94	0,99	0,98	
fLT	0,98	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	
Gp (WE>3.0 m)	15,07	15,07	12,12	12,12	8,58	8,58	10,94	10,94	
Gp diseño	15,07	15,07	12,12	12,12	8,58	8,58	10,94	10,94	
vpedg	2866,85	2866,85	2450,62	2450,62	1787,70	1787,70	2308,99	2308,99	Flujo de Saturación (S)
OCCpedg	0,69	0,69	0,65	0,65	0,58	0,58	0,63	0,63	
Rp (tabla)	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	
OCCr	0,61	0,66	0,50	0,62	0,53	0,55	0,41	0,60	
Vbicg	9,73	17,03	10,43	22,94	9,73	21,90	14,60	27,11	
OCCbicg	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	
OCCr	0,69	0,69	0,65	0,66	0,59	0,59	0,64	0,64	

Nrec	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Nturn	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
ApbT (Nrec=Ngiro)	0,31	0,31	0,35	0,34	0,41	0,41	0,36	0,36	
ApbT (Nrec>Ngiro)	0,58	0,58	0,61	0,61	0,65	0,65	0,62	0,61	
ApbT diseño	0,31	0,31	0,35	0,34	0,41	0,41	0,36	0,36	
fRPB	0,93	0,60	0,93	0,80	0,94	0,75	0,94	0,90	
fLPB	0,74	0,97	0,82	0,97	0,85	0,97	0,87	0,97	
<u>S</u>	<u>1044,59</u>	<u>569,26</u>	<u>1176,82</u>	<u>749,58</u>	<u>1120,82</u>	<u>671,13</u>	<u>1244,80</u>	<u>1085,88</u>	
<u>C</u>	<u>429,28</u>	<u>233,94</u>	<u>564,23</u>	<u>359,39</u>	<u>460,61</u>	<u>275,81</u>	<u>596,82</u>	<u>520,63</u>	Capacidad
<u>Xi</u>	<u>0,36</u>	<u>0,55</u>	<u>0,69</u>	<u>0,70</u>	<u>0,35</u>	<u>0,42</u>	<u>0,56</u>	<u>0,48</u>	Radio de flujo
<u>Xi diseño</u>	<u>0,36</u>	<u>0,55</u>	<u>0,69</u>	<u>0,70</u>	<u>0,35</u>	<u>0,42</u>	<u>0,56</u>	<u>0,48</u>	
<u>dI</u>	<u>14,89</u>	<u>16,34</u>	<u>17,73</u>	<u>17,79</u>	<u>14,77</u>	<u>15,31</u>	<u>16,48</u>	<u>15,81</u>	
<u>Rp (tabla)</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	
<u>Fpa (tabla)</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	
<u>P</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>	
<u>PF</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	<u>1,15</u>	
<u>k (para semaforos, 0,5)</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	Demoras
<u>I</u>	<u>0,94</u>	<u>0,82</u>	<u>0,66</u>	<u>0,65</u>	<u>0,95</u>	<u>0,91</u>	<u>0,80</u>	<u>0,87</u>	
<u>d2</u>	<u>2,23</u>	<u>7,35</u>	<u>4,62</u>	<u>7,23</u>	<u>1,96</u>	<u>4,25</u>	<u>3,08</u>	<u>2,79</u>	
<u>d residual</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	
<u>Demora por carril</u>	<u>20,29</u>	<u>27,07</u>	<u>25,93</u>	<u>28,62</u>	<u>19,89</u>	<u>22,79</u>	<u>22,96</u>	<u>21,91</u>	
<u>Demora en aproximación</u>	<u>23,35</u>		<u>27,08</u>		<u>21,11</u>		<u>22,51</u>		
<u>Demora en intersección</u>				<u>23,97</u>					

La finalidad del cálculo de todos los parámetros mostrados en la Tabla 7 es determinar las demoras por carril, PAs e intersección en general. Se puede observar que el carril que registra la mayor demora es el carril derecho del PA2 con 28.62 seg/veh, seguido del carril derecho del PA1 con 27.07 veh/seg. En general, solo PA4 no tuvo sus mayores demoras en su carril derecho, debido a que no existen estacionamientos en este sector, por lo que se puede identificar a este componente vial como un factor determinante en las demoras producidas, incluso se obtuvieron menores demoras en PA4 con relación a PA1 a pesar de que en PA4 se registró una mayor frecuencia vehicular.

Las demoras más bajas se registraron en el PA3, debido a que tanto el flujo vehicular como el peatonal y ciclista fueron mucho más bajos con relación a los demás. El tiempo de demora dentro de la intersección en general fue de 23.97 seg/veh.

Una vez obtenidas las demoras, se determinó el nivel de servicio (Tabla 8):

Tabla 8*Niveles de servicio en intersección semaforizada*

Nivel de servicio	PA 1		PA 2		PA 3		PA 4	
	I	D	I	D	I	D	I	D
Carril	C	C	C	C	C	C	C	C
PA	C		C		C		C	
Intersección	C							

Mediante el análisis de la Tabla 8 se establece que, a pesar de haber diferencias en seg/veh dentro de los carriles y PAs, todos encajan en el nivel de servicio C. Este nivel de servicio, que está dentro de los niveles aceptados para la obtención de una movilidad urbana normal (Loor et al., 2021), es la frontera para la aparición de un nivel de servicio indeseable, con demoras muy por encima de lo permitido para un confort adecuado de los usuarios. Por este motivo, para mejorar las condiciones actuales de movilidad y hacerle frente al crecimiento acelerado del vehículo privado, se plantean las siguientes medidas de solución:

- **Programas de educación vial:** Se deberán implementar campañas para capacitar a las personas sobre la educación vial, especialmente a niños de escuela, que serán los actores principales en la obtención de una movilidad urbana sostenible. Estas campañas deberán ser periódicas e interactivas para que resulten más llamativas para los usuarios más pequeños.

- **Restricción de estacionamientos en PA1 y PA2:** Al prohibir los estacionamientos en estos dos puntos importantes de aproximación, se reducirán considerablemente los seg/veh en los carriles derechos de cada sección, mejorando la movilidad urbana. Para el PA1, la reducción de tiempo será de 3.21 seg/veh mientras que para el PA2 será de 3.67 seg/veh, consiguiendo una reducción general dentro de la intersección de 0.77 seg/veh, que en términos de tránsito es muy importante para obtener resultados positivos en la movilidad vehicular, peatonal y ciclista, a pesar de que aún se mantenga en un nivel de servicio C (Figura 9). En cuanto al PA3, que también permite estacionamientos, no se considera relevante su prohibición, debido a que este PA es el que represente el menor flujo vehicular y, por ende, el de menor incidencia dentro de la intersección.

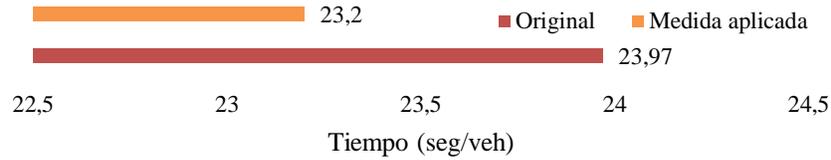


Figura 9

Comparación de demoras en la intersección general entre situación actual y aplicación de restricción de estacionamientos en PA1 y PA2.

- Restricción vehicular por placa: Esta medida, al ser considerada sumamente invasiva para los usuarios de cualquier ciudad, conseguiría una mejora sustancial en la circulación urbana. Estará destinada únicamente a los vehículos livianos privados. Debido a que casi el 60% del tránsito aforado (ver condiciones en metodología) contaba con el último dígito de placa impar, se esperaba que, en los días de restricción de este grupo de usuarios, la movilidad sería aún mucho mejor. Considerando una distribución por placa de 50% y 50% (pares e impares), la aplicación de esta medida (independiente de las medidas anteriores), representará una reducción general dentro de la intersección de 5.07 seg/veh, permitiendo categorizar a la zona de estudio en un Nivel de Servicio B, considerado óptimo para una movilidad urbana adecuada (Fig. 10). La medida podría aplicarse únicamente en los horarios comprendidos entre las 8h00-10h00, 12h00-14h00 y 16h30-18h30, que son los horarios de mayor congestión vehicular.

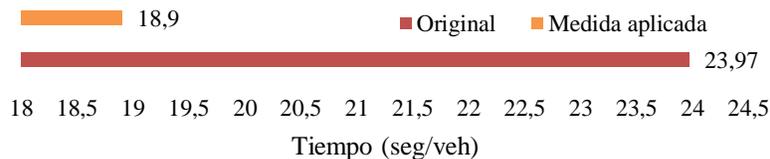


Figura 10

Comparación de demoras en la intersección general entre situación actual y aplicación de restricción de restricción vehicular por placa

- Restricción de giros a la izquierda (aplicación a futuro): Esta medida deberá ser aplicada únicamente cuando el nivel de servicio de la intersección alcance la categoría “D”, para permitir obtener nuevamente el grado “C”. La intersección bajo estudio alcanzaría el nivel

de servicio D cuando el flujo vehicular en sus horas pico presente un incremento del 44% de su flujo vehicular o sus medidas geométricas varíen considerablemente.

- **Aplicación de sistema “carpooling”:** Esta medida consistirá en compartir vehículos con usuarios que mantengan una ruta similar de viaje, el cual puede ser incentivado mediante los programas de educación vial propuestos en secciones anteriores. Según Ogoño & Orozco (2020), las familias ecuatorianas hacen uso de 2 a 3 vehículos por hogar (dependiendo de su capacidad adquisitiva), debido a que cada integrante tiene la necesidad de desplazarse a distintos puntos de la ciudad. Si se considera únicamente (mediante la aplicación de esta medida) que el índice ocupacional de un vehículo compartido será de 2 usuarios/vehículo, se reduciría aproximadamente el 30% del flujo vehicular dentro de la intersección semaforizada, generando una reducción de 3.18 seg/veh dentro de la zona de estudio, y que, a pesar de aún mantenerse en un nivel de servicio C, está muy próximo a convertirse en B, siendo muy favorable para la movilidad urbana (Figura 11).

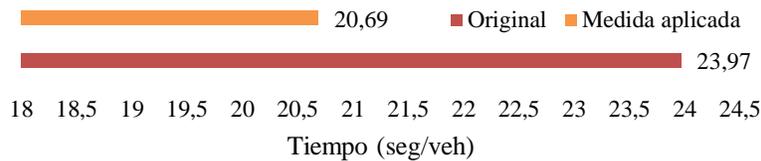


Figura 11

Comparación de demoras en la intersección general entre situación actual y aplicación de “carpooling”

Conclusiones

Las condiciones actuales de la intersección analizada la categorizaron con un nivel de Servicio “C”, con una demora general de 23.97 seg/veh, identificando al carril derecho del PA2 como la sección de mayores problemas de circulación, debido a que su demora alcanza los 28.62 seg/veh, siendo la más próxima para ser considerada con un nivel de servicio “D”. Pese a esto, la intersección aún permite un grado de confort aceptable para los usuarios que lo transitan, pero se debe mantener un control constante para que no exista degradación en este indicador de servicio.

La medida de mayor impacto en la mejora del nivel de servicio de la intersección estudiada fue la restricción vehicular por placa, pero al ser considerada muy invasiva, se recomienda su utilización únicamente cuando las demás medidas no permitan mejorar el grado de servicio de la zona de estudio. Se recomienda aplicar inmediatamente los programas de educación vial, para evitar la utilización de medidas más estrictas y que sean menos agradables para los usuarios.

Los vehículos pesados y buses no fueron considerados como medios de transporte perjudiciales dentro de la zona de estudio, debido a que, en general, representaron únicamente el 1.27% del flujo motorizado aforado.

La presente investigación puede ser replicada en demás puntos importantes dentro de cualquier ciudad del país o la región, para poder determinar el grado de satisfacción que brinda una intersección semaforizada y establecer medidas de solución específicas como las propuestas en el trabajo actual.

Bibliografía

- Aznar, M. (1998). El siglo XIX el cauce de la memoria. Madrid: Istmo. [En línea] Disponible:<https://books.google.com.ec/books?id=D4sS413l8nEC&pg=PA142&lpg=PA142&dq=la+necesidad+de+crear+calles+a+finales+del+siglo+XIX&source=bl&ots=c602PHc6CM&sig=ACfU3U1Niml3Pfk4jUpzaFUz6LN3x2m4Pw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjH1NbtzO3oAhWDneAKHYhhBqwQ6AEwAHoECAkQKw>
- Casanova, G., & Delgado, D. (2015). Diagnóstico del tráfico, alternativas y soluciones al congestionamiento vehicular en la Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Manabí, Ecuador: Universidad Técnica de Manabí.
- Castillo, J. I. R., Zambrano, D. A. V., Gutiérrez, D. A. D., & Hernández, E. H. O. (2020). Análisis del tránsito peatonal, alternativas y soluciones a congestionamientos en la Avenida América, entre Avenida Manabí y Calle Ramón Fernández. Portoviejo-Manabí. Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721, 5(2), 33-44.
- Chiluisa, M., Jalil, J., Vallecilla, A., Delgado, D. (2020). Movilidad Urbana Sustentable: Centro Histórico de Latacunga - Ecuador, Editorial Grupo Compás, Guayaquil Ecuador, 277 pag.
- Dalkmann, H., Sakamoto, K.: Transport: Investing in Energy and Resource Efficiency. UNEP, Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication, pp. 374–411 (2011)
- Delgado, D., Quiroz, S., Casanova, G., Álava, M. A. C., & Silva, J. P. C. D. (2021, May). Urban Mobility Characterization and Its Application in a Mobility Plan. Case Study: Bahía de Caráquez–Ecuador. In International Conference on Water Energy Food and Sustainability (pp. 594-604). Springer, Cham.

- Delgado Gutiérrez, D. A., Cruz da Silva, J. P., Casanova Ruiz, G. J., & Ortiz Hernández, E. H. (2020). Plan de movilidad urbana y espacios públicos sostenibles. Caso de estudio Bahía de Caráquez.
- Gutiérrez, D. A. D., Hernández, L. L. L., Suarez, W. J. P., & Hernández, E. H. O. (2020). Análisis del tránsito vehicular, alternativas y soluciones a congestionamientos en la Avenida América, entre avenida Manabí y calle Ramón Fernández-Portoviejo-Manabí. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 5(2), 11-23.
- HCM (2000) Highway Capacity Manual 2000, Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- INEC. (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - Ecuador.
- Jiménez Serpa, J. C., & Salas Rondón, M. H. (2017). Aplicación de modelos econométricos para estimar la aceptabilidad de una tasa por congestión vehicular. *Inge Cuc*.
- Lozano, A., Torres, V., & Antún, J. P. (2003). Tráfico vehicular en zonas urbanas. *Ciencias*, (070).
- Nasareno, E. R. C., Macías, K. G. Á., Gutiérrez, D. A. D., & Hernández, E. H. O. (2020). Caracterización de la movilidad vehicular y peatonal en la Universidad Técnica de Manabí. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 5(2), 64-75.
- Ogoño Aguinza, J. R., & Orozco Calva, L. F. (2020). Análisis del tránsito vehicular en las intersecciones viales en el centro histórico de la ciudad de Loja, determinando el nivel de servicio (Bachelor's thesis).
- Peñabaena-Niebles, R. (2015). Impact of transition between signal timing plans in social cost based in delay, fuel consumption and air emissions. *Transportation Research Part D, Transport and Environment*, Volume 41, December 2015, p.445-456.
- Lloor, J., Hernández, E. O., & Delgado, D. (2021). Análisis del nivel de servicio en la intersección de las avenidas Manabí y América, Portoviejo, Ecuador. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 6(2), 29-42.