

Analysis of the design of bicycle lanes using simulation of vehicular traffic on a main avenue in Metropolitan Lima.

Cesar Corrales, Mg¹, Jonatan Rojas, Mg¹, Wilmer Atoche¹

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima

ccorral@pucp.edu.pe, jrojas@pucp.edu.pe, watoche@pucp.edu.pe

Abstract– As a result of the COVID-19 pandemic, many bicycle lanes have been created in the city of Lima, as an efficient and eco-friendly transportation system that, among its main objectives, is to encourage the use of bicycles as transportation and to ultimately reduce environmental pollution in the city of Lima. However, due to poor design and planning, poorly located bicycle lanes have been generated, which are rarely used and require the elimination of vehicle lanes. This can significantly increase traffic time on the stretches in question and increases the amount of emissions due to

vehicular congestion. The present study, using a simulation model with Arena software, based on data collected over a defined period of time, has determined that the time spent on a stretch of a major road in the city of Lima has increased by 30.7% compared to the time without a bicycle lane. This, in addition to generating a problem among drivers, generates higher pollutant emissions, thus failing to comply with the objective of the bicycle lane.

Keywords– traffic simulation, vehicular flow analysis, unsustainable bike lane, pollution, Arena.

Análisis del diseño de Ciclovías usando simulación del tránsito vehicular en una avenida principal de Lima Metropolitana

Cesar Corrales, Mg¹, Jonatan Rojas, Mg¹, Wilmer Atoche¹

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima

ccorral@pucp.edu.pe, jrojas@pucp.edu.pe, watoche@pucp.edu.pe

Resumen– A raíz de la pandemia COVID-19 se han habilitado muchas ciclovías en la ciudad de Lima, como un sistema de transporte eficiente y eco amigable que, entre sus principales objetivos, tiene el de fomentar el uso de la bicicleta como transporte y de reducir a la larga la contaminación ambiental de la ciudad de Lima. Sin embargo, debido a un mal diseño y planificación, se han generado ciclovías mal ubicadas, muy poco utilizadas y que requiere la eliminación de carriles vehiculares. Esto puede incrementar notablemente el tiempo de circulación por los tramos en cuestión y aumenta la cantidad de emisiones debido a la congestión vehicular. El presente estudio, empleando un modelo de simulación con el software Arena y a partir de datos recopilados en un periodo de tiempo definido, ha determinado que el tiempo de paso en un tramo de una importante vía de circulación de la ciudad de Lima, ha sufrido un incremento de 30,7% en relación con el tiempo sin ciclovía. Esto, además de generar un problema entre los conductores, genera mayores emisiones contaminantes, incumpliendo el objetivo de la ciclovía.

Keywords– simulación en tránsito, análisis de flujo vehicular, ciclovía no sostenible, contaminación, Arena

I. INTRODUCCIÓN

Según un estudio desarrollado en la ciudad de Lima, alrededor del 37.5% de sus habitantes se encuentra satisfecho con su ciudad para vivir; en el Callao esta cifra se reduce a 29%. Entre las principales causas de la insatisfacción en la ciudad de Lima, están la inseguridad ciudadana con 87,2%, el transporte público con 46,2%, la corrupción de funcionarios o servidores públicos 38,6%, la limpieza pública / acumulación de basura con 32,5%, y la contaminación ambiental respectivamente con el 28,5% de la población [1]. Con respecto al último indicador, la ciudad de Lima es la séptima ciudad con más polución de aire en Latinoamérica, entre otras cosas, porque concentra alrededor del 30% de la población del país, y por ende demanda más consumo de energía, mayor cantidad de empresas que generan gases y contaminación, y un mayor parque automotor [2].

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), se estima que alrededor de 7 millones de personas mueren al año por la contaminación del aire. Además, se estima que, en la ciudad de Lima, el 70% de la contaminación del aire se puede atribuir al parque automotor, teniendo, en promedio un parque automotor de 13,6 años [3]. En la figura 1,

se detalla que durante el 2013 se vendieron 192 680 vehículos, y en el 2019 bajo hasta 168 647 vehículos. Las ventas cayeron más durante el primer año de pandemia, 125 090 vehículos.

No obstante, a fines de año 2022 se cerró con una venta anual de 177 543 vehículos [4]. Esto representa una cifra alarmante, dado que no existe un flujo de renovación de vehículos, sino que es un aumento al flujo vehicular actual. Lo cual genera como un círculo vicioso mayor improductividad en el transporte, ya sea público o privado. En el conocimiento empírico, un limeño pasa en promedio aproximadamente 4 horas en el tráfico urbano diariamente.

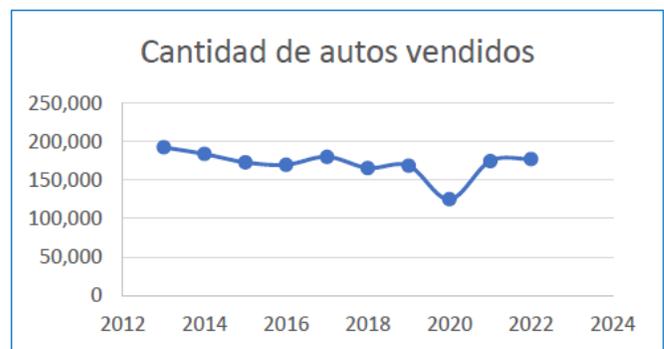


Fig. 1 Cantidad de autos vendidos por año [4]

Los problemas mencionados, han hecho actuar a los diferentes municipios para mejorar su flujo de transporte, optando por mejorar las rutas del servicio público y estimulando el transporte limpio mediante el uso de bicicletas.

En Lima, a raíz de la pandemia se han implementado numerosas ciclovías que normalmente emplean un carril de avenidas muy transitadas, como la Av. La Marina o la Av. Canaval y Moreira, buscando facilitar y fomentar el uso de bicicletas y pensando en lograr un impacto positivo sobre el medio ambiente. Este diseño ha sido aparentemente poco eficiente pues además de no contar con un flujo considerable de ciclistas, origina grandes atascamientos por exceso de flujo, ahora que se está regresando a la carga normal de tránsito. Resulta pues de suma importancia analizar la situación actual de la congestión, en comparación con una situación inicial, sin ciclovías, aplicando simulación, para posteriormente determinar, entre otras cosas, el impacto ambiental real de la

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

solución actual planteada. De acuerdo con los resultados se podrán efectuar planteamientos alternativos al diseño y trazo actual, tomando como proyecto piloto, una zona particular de un distrito de Lima.

II. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se define las principales herramientas conceptuales que sirven de soporte para la elaboración de la presente investigación.

Las emisiones contaminantes han sido un tema de interés en las últimas décadas. No sólo los ecologistas, sino también los gobiernos están tomando medidas rápidas para reducir las emisiones. El consumo de combustible de los vehículos tiene un papel importante en la contaminación del aire pues la energía del combustible debe superar con diversas pérdidas (resistencia al viento, arrastre de los neumáticos y otros) y se encuentra al propulsar el vehículo, y al proporcionar energía a los sistemas del vehículo, como el encendido o el aire acondicionado [5]. De esta manera, el sector del transporte tiene un gran impacto en el aumento de las emisiones de CO₂, produciendo una cuarta parte de las emisiones mundiales de CO₂ debido al uso intensivo de combustibles fósiles [6]. En ese sentido hay varias variables que afectan a las emisiones del transporte como por ejemplo, el volumen de tráfico, las características funcionales de las carreteras, la velocidad de los vehículos, las características de la carretera, las características de los vehículos y otros factores, de manera que, por ejemplo, un alto índice de contaminación está relacionado con un alto volumen de tráfico en las zonas urbanas de manera que la contaminación aumenta con el incremento del volumen de tráfico y el tiempo que los vehículos están parados en las carreteras [7].

Por otro lado, también la calidad de las calles afecta a la cantidad de emisiones de CO₂ producidas, esto es, un coche que se mueve a una velocidad constante producirá menos emisiones de CO₂ que un coche obligado a arrancar y detenerse cada cierto tiempo debido a factores externos, como grietas en la calzada provocadas por malos elementos del paisaje urbano y otros factores [6].

También se puede agregar que las condiciones de movimiento del vehículo (aparición de resistencia externa) afectan el consumo de combustible, dada la mayor demanda de energía por el número de paradas del vehículo a lo largo de la ruta, es decir, las paradas y la conducción en los atascos, esto debido a que la cantidad de tráfico determina la velocidad de aceleración del vehículo, lo que limita la capacidad del conductor para conducir de forma económica, y a que, la generación de energía potencial adicional se traduce en un mayor consumo de combustible [8]

El rendimiento de los sistemas de transporte es de vital importancia para la movilidad individual, el comercio y el

bienestar y el crecimiento económico de todas las naciones, sin embargo, existen problemas considerables que hay que superar y que pueden resolverse mediante el uso de sistemas de transporte inteligentes, para minimizar esas emisiones, que los ingenieros del automóvil han trabajado sin descanso [9]. Los investigadores se han esforzado por cambiar los combustibles fósiles por otros alternativos y de intentar aplicar diversas estrategias de conducción para agilizar el tráfico y reducir la congestión y las emisiones de gases de efecto invernadero [10].

En ese sentido, los desplazamientos activos (a pie y en bicicleta) son beneficiosos para la salud de las personas y tienen muchos beneficios, como la reducción de la congestión de los vehículos de motor y la contaminación en las zonas urbanas de manera que los beneficios para la salud y la prevención de lesiones superan la reducción de las emisiones de carbono que se calcula que se derivan de la inversión en desplazamientos activos [11]. Los beneficios incluyen la mortalidad evitada y la reducción de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, hospitalizaciones, días de actividad restringida y días de trabajo perdidos [12].

El desarrollo de infraestructuras para ciclistas, peatones y personas con necesidades especiales, el empleo de fuentes de energía renovables, la accesibilidad a la información y la educación sobre los beneficios de la movilidad urbana sostenible se consideran las más eficaces y tienden a predominar, tanto en la teoría como en la práctica" [7]. Eso implica también el empleo de cualquier modo de transporte que tenga un bajo impacto en el medio ambiente, como el transporte "no motorizado", "a pie", "en bicicleta", "desarrollo orientado al tránsito", "vehículos ecológicos" y "coche compartido" [7].

En relación a las herramientas que se usarán para el estudio podemos indicar que Taha (2012) define el proceso de modelamiento matemático empezando por delimitar el mundo real supuesto que se abstrae del mundo real, enfocándose en las variables más importantes que puedan explicar el sistema que se quiere modelar, de esta manera el modelo se origina como abstracción de las relaciones matemáticas del mundo real supuesto [13]. Un modelo que no alcanza a predecir lo que ocurrirá en el mundo real supuesto debe descartarse, pero analizar sus fallas posibilita el perfeccionamiento del siguiente modelo.

La solución del modelo matemático establece una base para tomar una decisión, pero siempre se debe tener en cuenta factores intangibles o no cuantificables como, por ejemplo, el comportamiento humano para poder llegar a una decisión final. Algunos procesos de modelización, dentro de los cuales se incluye un proceso matemático, consisten en seis procesos de modelización matemática, formular la tarea; seleccionar los objetos relevantes, la relación, etc.; traducir esos objetos y relaciones; utilizar métodos matemáticos para lograr resultados y conclusiones matemáticas; interpretar esos resultados y

conclusiones; y evaluar la validez del modelo [14]. Los pasos de la modelización matemática son siete: comprender, simplificar / estructurar, matematizar, trabajar matemáticamente, interpretar, validar y exponer [15]. El concepto de modelización matemática es multifacético. Entre los diversos aspectos del modelado matemático, se ha centrado en que el modelado matemático es un proceso de pensamiento que conecta el mundo real con las matemáticas [16]. La modelización matemática se caracteriza por la atención explícita al principio del proceso de llegar del problema fuera de las matemáticas a su formulación matemática, vinculando la matemática con el mundo real [17]

Algunos de los problemas que son de alta complejidad no pueden ser resueltos aplicando algoritmos y modelos ya existentes, por esta razón se recurre a los algoritmos heurísticos que, en comparación con los métodos exactos, suministran una “buena” solución al problema, pero no necesariamente una solución óptima aunque, si el algoritmo heurístico está bien diseñado, puede proporcionar una solución que al menos esté cerca de ser óptima o concluir, en su defecto, que no existen soluciones; los algoritmos heurísticos son iterativos, donde cada iteración implica una nueva solución que podría ser mejor que la solución que se encontró con anterioridad [18].

Por otro lado, la simulación es usada de forma muy intensa en muchos campos como las finanzas, administración y fabricación y a todo nivel, estratégico, táctico y operativo. En la ingeniería industrial en particular, es ampliamente usada en la gestión de operaciones. La simulación es una herramienta muy útil para la toma de decisiones a todo nivel. Las aplicaciones clásicas de la simulación pasan por diseño del sistema, diseño de instalaciones, disposición de planta, diseño del sistema de manejo de materiales, planificación de las operaciones, programación, control en tiempo real, políticas operativas, diseño de la cadena de suministro, gestión de la cadena de suministro, diseño del proceso, gestión del inventario, gestión del mantenimiento, compras, diseño del producto, ergonomía, gestión del conocimiento, entre otros [19]. En el caso del transporte existen muchos simuladores de tráfico o de red como SUMO, VISSIM, CORSIM, NS-2, NCTUns, JiST, TraNS, STRAW y otros, pero aplicados al transporte urbano, por ejemplo, en la sincronización de semáforos, identificación de paradas de autobuses, pero no se encuentran muchos simuladores de accidentes y por tanto de accidentes en carretera [20].

Simulación es el desarrollo de un modelo lógico—matemático de un sistema, con el fin de obtener algo similar a la operación de un proceso real o de un sistema a través del tiempo. Se puede realizar a mano o en computadora e involucra la generación de una historia artificial de un sistema; se observa esta historia mediante la manipulación experimental [21]. Entre sus ventajas esta que nos permite estudiar el comportamiento de un sistema bajo ciertas condiciones predeterminadas, pueden

compararse distintos diseños de sistemas, permiten un mejor control sobre los parámetros de funcionamiento que en el sistema real y permiten estudiar un sistema en un marco temporal adecuado, aumentando o reduciendo el tiempo según se requiera [22].

Los elementos fundamentales en una simulación son las variables y los eventos. Existen tres tipos de variables: variables de tiempo, variables de conteo o contadores y variables de estado. Los eventos modifican los valores de estas variables y como resultado de estas modificaciones se crean los datos de interés [23].

III. METODOLOGÍA DEL CASO DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló mediante el soporte del uso de modelos de simulación discreta, que permitieron comparar la congestión vehicular en diferentes escenarios, antes y después de la implantación de ciclovías en la Av. Faustino Sánchez Carrión entre las Avenidas Salaverry y Brasil. La hipótesis de la investigación es que la actual red de ciclovías de un distrito de Lima genera una congestión vehicular no aceptable, siendo la consecuencia, un resultado en contra del objetivo de diseñar e implementar una ciclovía.

La metodología a emplear tiene las siguientes fases:

- **Fase 1:** Recopilar información técnica de modelos de simulación de flujo vehicular y emisión de contaminantes
- **Fase 2:** Delimitar el alcance del estudio, definiendo el ámbito geográfico, y por tanto la ruta o rutas a estudiar
- **Fase 3:** Determinar la magnitud del flujo vehicular con un levantamiento de una muestra de datos, en forma directa en la ruta seleccionada, por donde pasa una ciclovía, para usarlos en la simulación propuesta
- **Fase 4:** Diseñar un modelo de simulación de flujo vehicular con y sin ciclovías

Fase 1: Recopilar información técnica de modelos de simulación de flujo vehicular y emisión de contaminantes

En esta fase se ha revisado la literatura existente y se desarrolló el estado del arte, además de la búsqueda de información técnica sobre modelos de simulación de flujo vehicular y emisión de contaminantes. La revisión corresponde principalmente a publicaciones de cuartil 1, y a libros de referencia en la materia, por ejemplo, en el caso de modelación matemática, se usaron los libros de Hamdy Taha, y Hillier & Lieberman.

Fase 2: Delimitar el alcance del estudio, definiendo el ámbito geográfico, y por tanto la ruta o rutas a estudiar

Establecer las vías a estudiar, que tengan ciclovías en su trazado. En la ciudad de Lima y Callao existen más de 250 kilómetros en 50 ciclovías habilitadas en 14 distritos.



Fig. 2 Diseño de rutas de ciclovía en Lima y Callao

No obstante, su diseño ha sido paupérrimo y carente de una estrategia, es decir, vemos ciclovías desconectadas en tramos (observe la figura 2, las líneas de color morado). Además, observamos ciclovías que, para su implementación, han violado las restricciones de dimensiones de un carril de una avenida (observe la figura 3).



Fig. 3 Construcción de ciclovía en el tercer carril de la avenida

Para la presente investigación se estudió un tramo de calzada de la Av. Faustino Sánchez Carrión, entre las Avenidas Salaverry y Brasil. Este tramo, es uno de los más importantes para la ciudad. Colocándonos en contexto, en esta zona se encuentra las oficinas de las principales empresas del país, y las personas se dirigen a ellas de las diferentes partes de la ciudad (distintos distritos). A partir de la recopilación de datos, se puede estimar que aproximadamente circulan alrededor de 6 000 vehículos por hora, en horario de máxima congestión; y en promedio 3 000 vehículos por hora

Cabe mencionar que, unido al problema de reducción de los carriles de la avenida por la ciclovía, se evidencia una reducción de carriles en la secuencia de la avenida, pasando en menos de 100 metros de tres carriles a dos carriles, lo cual ocasiona un cuello de botella que repercute en el tiempo de viaje.

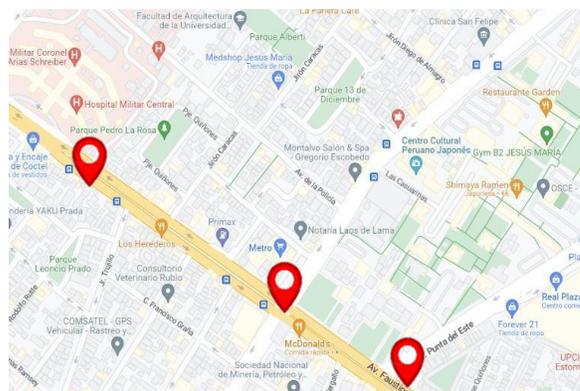


Fig. 4 Tramo seleccionado

Fase 3: Determinar la magnitud del flujo vehicular con un levantamiento de una muestra de datos, en forma directa en la ruta seleccionada, por donde pasa una ciclovía, para usarlos en la simulación propuesta.

Mediante el uso de estudio de tiempos se tomó muestras del flujo vehicular en los puntos encerrados con un globo rojo en la figura 4. La medición de tiempos y conteo directo empleando una muestra adecuada se determina el flujo vehicular por las calles y avenidas por donde pasa las ciclovías.

La muestra del flujo se realizó durante el periodo de una semana, comprendido entre el 25 de setiembre al 01 de octubre de 2022. En la tabla I se detalla las mediciones. Cabe resaltar que una medición contiene 30 datos de vehículos.

TABLA I
CANTIDAD DE MUESTRAS POR HORA - DÍA

Día / Hora	Cantidad de muestras por horas (*)						
	25- Set	26- Set	27- Set	28- Set	29- Set	30- Set	1- Oct
6:00 a 6:55	35	35	36	36	36	36	36
7:00 a 7:55	36	36	36	35	36	36	36
8:00 a 8:55	36	36	36	36	36	36	36
9:00 a 9:55	36	36	36	36	36	36	24
10:00 a 10:55	36	36	36	36	36	36	24
11:00 a 11:55	36	36	36	36	36	36	36
12:00 a 12:55	36	36	36	36	36	36	36
13:00 a 13:55	36	36	36	36	36	36	36
14:00 a 14:55	36	36	36	36	36	36	36
15:00 a 15:55	36	36	36	36	36	36	36
16:00 a 16:55	36	36	36	36	36	36	36
17:00 a 17:55	36	36	36	31	36	36	36
18:00 a 18:55	36	36	36	36	36	36	36
19:00 a 19:55	36	36	36	36	36	36	36
20:00 a 20:55	36	36	36	36	36	36	36
21:00 a 21:55	36	36	36	35	36	36	36
22:00 a 22:55	36	36	36	36	24	12	36
Total	611	611	612	605	600	588	588

(*) 1 muestra equivale 30 mediciones de vehículos

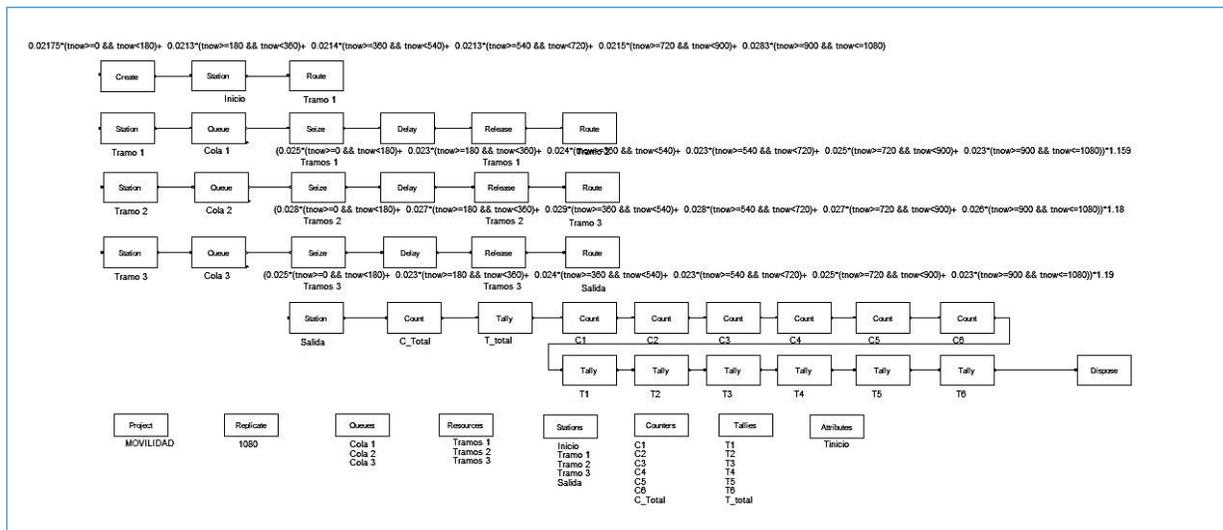


Fig. 5 Modelo de simulación del tramo de carretera (Arena)

La población del flujo vehicular es de aproximadamente 48 000 vehículos por día, valor estimado a partir de las mediciones. Para determinar el tamaño de muestra por día, se usó la fórmula descrita en la ecuación (1), con la cual se obtuvo un tamaño inicial de muestra de 18 002 vehículos. Esto implica que se deben realizar 600 mediciones por día.

$$n = \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 N \sigma^2}{(N-1)E^2 + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2} \quad (1)$$

Donde:

n = numero de vehículos analizar.

σ = Desviación estándar (310 vehículos).

N = Total de vehículos (48000 vehículos).

Z = nivel de confianza 95% = $1.959963 (95\% + \frac{\alpha}{2})$.

E = Error permitido (3.58 vehículos).

Fase 4: Diseñar un modelo de simulación de flujo vehicular con y sin ciclovías.

El modelo de simulación consiste en tres tramos de la vía (observe figura 4), uno conectado tras otro. El modelo toma distribuciones agrupadas en intervalos de 3 horas, durante el periodo de simulación de 06:00 a 24:00 horas del día estándar. El objetivo del modelo de simulación es comparar el impacto de la ciclovía, al ocupar una vía de tránsito vehicular automotriz. El modelo se desarrolló en el software Arena 16.2. El modelo de simulación se puede observar en la figura 5. El

modelo se corrió con 30 réplicas, para validar los 7 datos obtenidos en el muestreo.

Los supuestos del modelo de simulación se restringen a:

- No se malogran los vehículos en el tramo de carretera.
- No existen accidente en el tramo de carretera.
- Los semáforos y los policías de tránsito no restringen el flujo vehicular.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo de simulación se ha corrido con 30 réplicas, con dos escenarios, con ciclovía y sin ciclovía.

En la tabla II se detalla los tiempos promedios en minutos de cada intervalo de 3 horas de medición. Se puede observar que el tiempo promedio es de 10,841 minutos por tramo.

TABLA II
TIEMPOS PROMEDIO (MIN) POR INTERVALOS DE TIEMPO DE 3 HORAS – SIN CICLOVÍA

Identificador	Promedio	Observaciones
T1	11,538	48319
T2	11,031	48319
T3	11,58	48319
T4	11,182	48319
T5	11,526	48319
T6	8,1896	48319
T total	10,841	48319

En la tabla III se detalla los tiempos promedios en

minutos de cada intervalo de 3 horas de medición. Se puede observar que el tiempo promedio es de 14,172 minutos por tramo.

TABLE III
TIEMPOS PROMEDIO (MIN) POR INTERVALOS DE TIEMPO DE 3 HORAS – CON CICLOVÍA

Identificador	Promedio	Observaciones
T1	15,081	48319
T2	14,421	48319
T3	15,139	48319
T4	14,619	48319
T5	15,067	48319
T6	10,707	48319
T total	14,172	48319

En la tabla IV se detalla la cantidad de vehículos por intervalo de tiempo de 3 horas. Esta cantidad de vehículos por intervalo se usó en ambos modelos de simulación para constatar y validar el modelo de simulación y la diferencia de tiempos.

TABLE IV
CANTIDAD DE VEHÍCULOS A SIMULAR EN AMBOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Identificador	Cantidad
C1	8273
C2	8451
C3	8411
C4	8451
C5	8372
C6	6361
C Total	48319

V. CONCLUSIONES

El tiempo de paso simulado, antes de colocar ciclovías es de 10,84 minutos y después de colocar ciclovías es de 14,17 minutos. Este incremento de 30,7% se debe mayoritariamente al inhabilitado de un carril de la vía de tránsito.

Durante un día estándar de estudio de tránsito en la vía, circulan alrededor de 48000 vehículos, durante 18 horas, desde las 06:00horas a las 24:00 horas.

Durante las horas pico los flujos se incrementan y también los tiempos de paso, esto hace que el intervalo de tiempos sea de 10,71 a 15,14 minutos con ciclovía y de 8,19 a 11,58 minutos sin ciclovía.

Las horas pico son de 7:15 a 9:10 horas, de 12:10 a 14:50 horas y de 17:50 a 21:10 horas respectivamente en la mañana, mediodía y noche.

El flujo vehicular se mantiene o disminuye muy poco, esto hace que la ciclovía no esté siendo usada con el propósito de

reemplazo de uso de vehículos automotores y esto a su vez no impacta en la reducción de la contaminación ambiental.

Las propuestas municipales de uso de las ciclovías están vigentes, pero la población las usa como vías recreacionales y no como vías de transporte, esto hace que en casi todo el día, las ciclovías están siendo usadas muy por debajo de la capacidad esperada.

REFERENCIAS

- [1] Lima Cómo Vamos (2019). Lima y Callao según sus ciudadanos: Décimo Informe Urbano de Percepción sobre Calidad de Vida en la Ciudad. limacomovamos.org
- [2] RPP Noticias (2020). Lima es la séptima ciudad con más polución de aire en Latinoamérica. Publicado el 21 de enero del 2020. <https://rpp.pe/lima/actualidad/lima-es-la-septima-ciudad-con-mas-polucion-de-aire-en-latinoamerica-noticia-1240870>
- [3] RPP Noticias (2021). Parque automotor genera el 70% de la contaminación del aire en el Perú. Publicado el 08 de febrero del 2021. <https://rpp.pe/peru/actualidad/parque-automotor-genera-el-70-de-la-contaminacion-del-aire-en-el-peru-noticia-1319221>
- [4] Asociación automotriz del Perú - APP (2023). Informe Estadístico Automotor 2022. Informe elaborado por: Gerencia de Estudios Económicos y Estadística. <https://aap.org.pe/estadisticas/informe-estadistico-automotor/iea-2022/>
- [5] Deschle, N., van Ark, E. J., van Gijlswijk, R., & Janssen, R. (2022). Impact of Signalized Intersections on CO2 and NOx Emissions of Heavy Duty Vehicles. *Energies*, 15(3), 1–19. <https://doi.org/10.3390/en15031242>
- [6] Moussa, R. R. (2022). Reducing carbon emissions in Egyptian roads through improving the streets quality. *Environment, Development and Sustainability*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02150-8>
- [7] Mansour, A. I., & Aljamil, H. A. (2022). Investigating the Effect of Traffic Flow on Pollution, Noise for Urban Road Network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 961(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012067>
- [8] Grabowski, L. (2021). Modeling research of city bus fuel consumption for different driving cycles. *Journal of Physics: Conference Series*, 2130(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2130/1/012001>
- [9] Imtiyaz, S. H., & Sadique, S. A. M. (2015). Intelligent transport systems a comprehensive way to regulate and curb vehicular pollution. 2015 International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2015, 1230–1235. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322704>
- [10] Nasir, M. K., Md Noor, R., Kalam, M. A., & Masum, B. M. (2014). Reduction of fuel consumption and exhaust pollutant using intelligent transport systems. *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/836375>
- [11] Chapman, R., Keall, M., Howden-Chapman, P., Grams, M., Witten, K., Randal, E., & Woodward, A. (2018). A cost benefit analysis of an active travel intervention with health and carbon emission reduction benefits. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 1–10. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050962>
- [12] Olawepo, J. O., & Chen, L. W. A. (2019). Health benefits from upgrading public buses for cleaner air: A case study of Clark County, Nevada and the United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph16050720>
- [13] Taha, H. (2012). Investigación de operaciones. 9na. edición. Pearson.
- [14] Blomhøj, M., & Jensen, T. H. (2003). Developing mathematical modelling competence: Conceptual clarification and educational planning. *Teaching mathematics and its applications*, 22(3), 123-139.
- [15] Blum, W., & Leiß, D. (2007). How do Students and Teachers Deal with Modelling Problems? *Mathematical Modelling*, (1 997), 222–231. <https://doi.org/10.1533/9780857099419.5.221>

- [16] Ferri, R. B. (2006). Theoretical and empirical differentiations of phases in the modelling process. *ZDM - International Journal on Mathematics Education*, 38(2), 86–95. <https://doi.org/10.1007/BF02655883>
- [17] Pollak, H. (2007). Mathematical modelling. A conversation with Henry Pollak. En W. Blum, P. Galbraith, H.W. Henn y M. Niss (eds.), *Modelling and Applications in Mathematics Education, The 14th ICMI Study*, 10(28), 109-120. <http://doi.org/10.1007/97803872982219>
- [18] Hillier, F., & Lieberman, G. (2020). *ISE Introduction to Operations Research (ISE HED IRWIN INDUSTRIAL ENGINEERING)*. McGraw-Hill Education.
- [19] Polenghi, A., Fumagalli, L., & Roda, I. (2018). Role of simulation in industrial engineering: focus on manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 496–501. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.367>
- [20] Young, C. P., Chang, B. R., Chen, S. Y., & Wang, L. C. (2008). A Highway Traffic Simulator with Dedicated Short Range Communications based cooperative collision prediction and warning mechanism. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 114–119. <https://doi.org/10.1109/IVS.2008.4621243>
- [21] Azarang, M. R., & García, E. D. (2003). *Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos*. 1ra edición en español. McGraw-Hill Interamericana Editores SA. México.
- [22] Pazos, J. J., Suárez, A., & Díaz, R. P. (2003). *Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos*. Investigación Operativa 519.8. Pearson Educación SA. Madrid.
- [23] Ross, S. M. (1999). *Simulación*, 2a. edición. Department of Industrial Engineering and Operations Research University of California. Prenteci Hall. México.