

serie

CIUDADES
SUSTENTABLES



LA CIUDAD SE MUEVE ASÍ

Estado del arte de la investigación en movilidad urbana en Cuenca

L L A
C T A
lab



CIUDADES
SUSTENTABLES

serie



CIUDADES
SUSTENTABLES



LA CIUDAD SE MUEVE ASÍ

Estado del arte de la investigación
sobre movilidad urbana en Cuenca

LA CIUDAD SE MUEVE ASÍ

*Estado del arte de la investigación
sobre movilidad urbana en Cuenca*

©Universidad de Cuenca

LlactaLAB-Ciudades sustentables

Autores:

Carla Hermida, Manuela Cordero, Adriana Quezada, Daniel Orellana, Enrique Flores-Juca, Jessica Chica, Estefanía Mora-Arias, María Elisa Bustos, Mateo Marín, Natasha Cabrera, Augusta Hermida, Patricia Cazorla, Elina Ávila-Ordóñez, Jairo Ortega, János Tóth, Tamás Péter, Martín Ortega, Lisseth Molina, Paúl Arévalo, Antonio Cano, Vinicio Iñiguez-Morán, Danny Ochoa-Correa, Juan Leonardo Espinoza, Francisco Jurado, Néstor Rivera, Juan Molina, Andrea Bermeo, Gina Novillo, Xavier Serrano-Guerrero, Antonio Barragán-Escandón, Esteban Zalamea-León, Gustavo Álvarez-Coello, Andrés Baquero-Larriva, Mateo Coello-Salcedo, Daniel Cordero-Moreno, Efrén Fernández-Palomeque, Robert Rockwood-Iglesias, Francisco Torres-Moscoso, Diego Morales Jadán, Marco Toledo Orozco, Javier Cabrera Mejía

Compilador:

Daniel Orellana

Diagramación y portada:

Galo Carrión

María Augusta Hermida

Rectora de la Universidad de Cuenca

Centro Editorial UCuenca Press

Dirección: Daniel López Zamora. Coordinación editorial: Ángeles Martínez Donoso. Corrección de estilo: Verónica Andrade Aguilar

Ciudadela Universitaria
Doce de abril y Agustín Cueva
(+593 7)405 1000
Casilla postal 01.01.168
editorial.ucuenca.edu.ec

Este libro fue arbitrado con pares externos bajo el sistema doble ciego.

Primera edición

Tiraje: 200 ejemplares

Derechos de autor: CUE-00529

ISBN: 978-9978-14-536-4

ISBN digital: 978-9978-14-546-3

Impreso en Cuenca, Ecuador

Junio, 2024

Agradecimiento

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad de Cuenca y sus autoridades: rectora, María Augusta Hermida, vicerrectora, Monserrath Jerves y vicerrector académico, Juan Leonardo Espinoza por darme la oportunidad de desarrollar mi carrera académica durante la última década. Este libro fue elaborado como parte del período sabático otorgado por la Universidad. Estoy también enormemente agradecido con la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, que me acogió en los primeros años de vinculación a la Universidad y a donde he regresado desde el 2022.

Esta obra representa también el desarrollo de diez años de investigación sobre movilidad sostenible en Cuenca dentro del grupo de investigación LlactaLAB – Ciudades Sustentables, parte del Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca. LlactaLAB ha sido fundamental en mi desarrollo como científico y como persona; por esto extiendo mi profunda admiración a las maravillosas personas que lo conforman, en particular a quienes han colaborado con diferentes capítulos: Lisseth Molina, Adriana Quezada, María Elisa Bustos y Augusta Hermida. En este contexto, un reconocimiento especial a Galo Carrión quién ha sido clave en la concepción, desarrollo, diseño y producción del libro.

Finalmente, un agradecimiento a todos los investigadores e investigadoras que han colaborado como autores en esta obra colectiva, quienes han hecho un enorme esfuerzo de síntesis para poner su conocimiento y experiencia a disposición del público.

Daniel Orellana Vintimilla

INTRODUCCIÓN

La movilidad es uno de los procesos urbanos más complejos e interesantes, pues representa la huella de las interacciones de las personas con el entorno urbano (Orellana, 2011). Al estudiar la movilidad estamos también comprendiendo otros aspectos de la ciudad con los que está íntimamente relacionada, como el espacio público, los sistemas urbanos, la equidad social, la energía, la capacidad institucional, los aspectos ambientales y la salud de la población. La movilidad urbana es, pues, uno de los indicadores más importantes de la calidad de vida de una ciudad, lo que puede ser resumido en la frase “dime cómo te mueves y te diré que tipo de ciudad eres”.

El caso de Cuenca (Ecuador) es visto frecuentemente con interés por parte de tomadores de decisión, planificadores urbanos, investigadores, políticos y personas interesadas en temas urbanos. Su condición de ciudad intermedia, con una calidad de vida relativamente alta, servicios básicos de calidad, espacios públicos bien mantenidos y sistemas urbanos funcionales, la han llevado a ser considerada un caso atípico en el contexto de las ciudades latinoamericanas, y la movilidad es uno de los aspectos focales de ese interés.

vii

Breve historia de la movilidad en Cuenca

Desde inicios del siglo XXI, el fenómeno de la movilidad en Cuenca ha sufrido transformaciones importantes. En el 2000, la ciudad tenía una población de aproximadamente 276 mil habitantes en un área urbana de 6 395 hectáreas (Hermida et al., 2015). Para ese año se estima que circulaban alrededor de 35 mil vehículos

motorizados en la ciudad, lo que representaba una tasa de motorización de 12 vehículos por cada 100 habitantes. La limitada extensión de la mancha urbana y la densidad relativamente alta ofrecía las condiciones óptimas de una ciudad de cercanías, en la que una gran parte de la población podía movilizarse diariamente de manera fácil, cómoda y rápida, tanto a pie como en transporte motorizado o incluso en bicicleta. Sin embargo, el deficiente sistema de transporte público, compuesto en ese entonces por 664 buses, la mayoría de ellos antiguos y en malas condiciones y sin una planificación adecuada, y la creciente preocupación por los efectos de la contaminación en una ciudad recientemente declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad habían empujado a la ciudad a dar pasos para reorganizar el sistema de transporte. Hermida (2018) presenta un detallado análisis de la historia de la movilidad en Cuenca entre 1999 y 2014 e identifica algunos hitos importantes. Basados en dicho estudio, y con algunos datos adicionales, a continuación, repasamos brevemente algunos de los aspectos más importantes de la movilidad en la ciudad en las dos últimas décadas.

En 1999 el gobierno local asumió las competencias de tránsito y transporte y expidió la primera ordenanza de planificación del transporte (Ordenanza de Planificación, Organización y Regulación del Tránsito y Transporte Terrestres en el cantón Cuenca, 1999). También se realizó el primer estudio técnico denominado "Plan para un sistema de tráfico sustentable para una ciudad piloto, Cuenca-Ecuador. Cuenca" (PADECO, 1999), centrado principalmente en el transporte público colectivo.

A pesar de que ese plan no fue implementado en su totalidad, permitió dar avances clave, que incluyeron la reorganización de las rutas de transporte público y la conformación de la Cámara de Transporte de Cuenca en el 2000. También se implementó de manera obligatoria la revisión técnica vehicular para el transporte público, que en los siguientes años se extendió a los demás vehículos motorizados. En cuanto a la infraestructura, se inició la construcción de carriles exclusivos para buses en el Centro Histórico, no sin resistencia por parte de varios sectores; así mismo, se implementó el sistema de estacionamiento rotativo tarifado en varias de estas zonas, pero el fuerte rechazo al

modelo inicial basado en inmovilizar los vehículos infractores, obligó a retirarlo y reemplazarlo, más adelante, con un sistema de aviso mediante un adhesivo en la ventana del vehículo. En 2001 se inició la construcción de la primera ciclovia, enfocada en actividades recreativas y poca conexión con las necesidades de movilidad.

Para el 2004, se mostraban los primeros resultados de la nueva institucionalidad. Por ejemplo, se realizó la renovación y optimización de la flota de autobuses, que se logró reducir a 475 luego de rediseñar las rutas.

Alrededor de 2005 surge un tema polémico que se desvía de la tendencia hacia una movilidad sostenible: la propuesta de construir una nueva autopista perimetral en la zona norte de la ciudad, afectando casi 10 mil hectáreas de suelo principalmente rural. Este proyecto, que cobró un gran impulso hacia 2009, se contradecía con los esfuerzos del mismo gobierno local de controlar el crecimiento del parque automotor, fortalecer el transporte público e intentar mantener la compacidad de la ciudad. De hecho, tal proyecto se contradecía directamente con varios elementos del Plan de Ordenamiento Territorial de 2009. La propuesta fue fuertemente criticada por varios sectores, incluyendo expertos en planificación urbana, técnicos municipales, académicos y actores políticos.

Probablemente uno de los aspectos más importantes entre 2005 y 2010 fue el inicio de un acelerado proceso de dispersión urbana, en el que la densidad poblacional de la ciudad disminuyó debido a la creciente construcción de condominios en áreas periurbanas y rurales. Esta dispersión tuvo efectos nefastos que cambiaron radicalmente la trayectoria de desarrollo de la ciudad. Los promotores inmobiliarios podían construir condominios cerrados sin entregar un porcentaje para espacio público. Además, estos condominios estaban en zonas alejadas, con poca conectividad y bajo servicio de transporte público, lo que generó una mayor dependencia del automóvil particular.

En 2009, se implementó el sistema integrado de recaudo para todo el transporte público urbano, lo cual fue un paso fundamental, ya que eliminó la competencia por pasajes entre diferentes cooperativas. Cuenca fue también la primera ciudad

en el país en implementar la tarjeta electrónica como modo de pago en el transporte público. Además, en este año se elaboró el primer plan de ciclovías urbanas, aunque su implementación no avanzó. El 2009 también fue importante en términos de institucionalización, pues se creó la Secretaría de Movilidad, y el año siguiente se constituyó la Empresa Municipal de Movilidad EMOV.

En el 2011 se iniciaron los estudios de prefactibilidad del Tranvía de Cuenca, marcando un hito importantísimo en la movilidad de la ciudad, aunque este medio de transporte tardaría una década en entrar en funcionamiento, luego de un tortuoso proceso con enormes dificultades durante la contratación, construcción y puesta en marcha.

Para el 2012 se contrató el “Plan de Ciclovías Urbanas y Proyecto Definitivo para Fase Piloto y del Estudio para el Sistema de Transporte Público en Bicicleta de la Ciudad de Cuenca” (MOVEERE y EMOV EP, 2013). En ese año se estimaba que apenas el 1 % de la población utilizaba la bicicleta como medio de transporte. Sin embargo, es importante mencionar que ningún estudio ha incluido la movilidad de niños y adolescentes en las estimaciones, a pesar de que ellos son usuarios frecuentes de la bicicleta. En 2013 se inauguraron los terminales de transferencia que permitían conectar el transporte público urbano con el microregional y el nacional. Para el 2014, la implementación de ciclovías estaba completamente estancada, la mayoría de las existentes presentaban un diseño inadecuado, falta de conectividad y ubicaciones que no correspondían a las necesidades de planificación.

En el 2015 se elaboró el Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca. Este plan representa un giro radical de la planificación con una visión más integral que ya desde su título reconoce la importancia del abordaje conjunto de la movilidad y los espacios públicos. Aunque la implementación de este instrumento ha sido bastante limitada, durante los últimos años se han dado algunos avances importantes. Es así que entre 2016 y 2023 se construyeron nuevas ciclovías, continuando con el plan original de MOVEERE e incluyendo procesos de planificación participativa (Orellana y Quezada, 2018), hasta completar

un total de aproximadamente 70 km en el 2023. En el 2019 se construyó el Sistema de Transporte en Bicicleta Pública de Cuenca, con un total de 20 estaciones, a través de una alianza público-privada.

Finalmente, en el 2021 inició la operación comercial del Tranvía de Cuenca, luego de varios años de inconvenientes. A pesar de que el proyecto fue planificado como parte integral del sistema de transporte público, hasta el 2023 no se ha iniciado siquiera el proceso de integración operativa ni tarifaria con los demás sistemas.

Este breve repaso histórico da cuenta de los avances que ha tenido Cuenca en materia de movilidad. Sin embargo, y a pesar de ellos, el crecimiento del parque automotor no solo que ha continuado, sino que se ha acelerado. La falta de políticas públicas certeras e integradas para la aplicación de los planes existentes, la desarticulación entre la planificación urbana y la planificación de la movilidad, la fragmentación en la implementación de los proyectos clave, la descoordinación institucional y la descontrolada dispersión urbana han disminuido la calidad del sistema de movilidad de la ciudad. Es así como, según los datos actuales de población y matriculación vehicular, la tasa de motorización estaría en cerca de 38 vehículos por cada 100 habitantes, es decir que se ha triplicado en los últimos 25 años. Los impactos de este aumento son enormes en la población y el medio ambiente, lo cual representa, junto con la inseguridad, uno de los mayores deterioros de la calidad de vida en la ciudad.

XI

La investigación de la movilidad en Cuenca

Cuenca goza de una escena académica particularmente dinámica y productiva en aspectos relacionados a la movilidad. Entre 2015 y 2022, se han publicado 73 artículos científicos en revistas indexadas en SCOPUS y SCIELO, que tratan sobre movilidad en esta ciudad. Esto es un excelente indicador del interés académico en estos aspectos, y el alcance internacional de la investigación local. Además, existe un importante número de artículos

publicados en revistas indexadas en otras bases de datos regionales, libros, reportes técnicos, trabajos académicos, proyectos de fin de carrera y tesis de postgrado. Esta producción científica subraya el inmenso potencial que Cuenca tiene para desarrollar una movilidad sostenible basada en evidencia.

Sin embargo, y a pesar de la rica producción científica, existe una desconexión entre la investigación generada y el acceso a esta por parte de tomadores de decisiones, planificadores, estudiantes e incluso otros investigadores. De los 73 artículos científicos sobre movilidad en Cuenca, apenas un tercio son de acceso abierto, mientras que la mayoría requiere suscripción a costosas bases académicas especializadas para su consulta. Incluso más preocupante es que algunos de estos trabajos se publican en editoriales a las cuales ni siquiera las universidades locales están suscritas. Adicionalmente, el idioma puede representar un obstáculo, pues 9 de cada 10 artículos están publicados en inglés. Este escenario plantea un serio desafío para universidades y grupos de investigación: se está generando conocimiento valioso para la ciudad, pero con acceso extremadamente limitado.

Objetivos y organización del libro

Esta obra colectiva tiene como objetivo sistematizar, divulgar y mejorar la visibilidad de la investigación académica en movilidad urbana en Cuenca.

El libro se compone de 13 capítulos, organizados en 3 secciones que exploran una amplia gama de temas. La primera sección "Usuarios" incluye investigaciones que exploran la relación de las personas con la movilidad, incluyendo grupos de interés como la niñez, la población en zonas periurbanas, los aspectos de género y las personas con discapacidad. La segunda sección, denominada "Sistemas", presenta investigaciones relacionadas con los diferentes sistemas de movilidad de la ciudad: el transporte público en bus, el sistema de bicicleta pública, el tranvía, los sistemas de *Park and Ride* (estacionamientos aso-

ciados al transporte público), y algunos aspectos de la movilidad motorizada. Finalmente, la tercera sección, llamada “Electromovilidad” recopila investigaciones en este campo que genera creciente interés como una estrategia para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Este libro es el resultado de un esfuerzo colaborativo sin precedentes que involucra a 45 investigadores de 12 grupos y departamentos de seis universidades diferentes: la Universidad de Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana, Universidad del Azuay, Universidad Católica de Cuenca, Universidad de Jaén y Budapest University of Technology and Economics. Cabe destacar que todos los autores invitados aceptaron participar y se esforzaron por condensar su investigación en capítulos breves redactados en español y en un lenguaje accesible para un público más amplio.

Aunque la obra es colectiva, cada capítulo fue desarrollado de manera individual o en grupos pequeños por sus respectivos autores. Esto no solo enriquece la diversidad temática del libro, sino que también permite la inclusión de perspectivas múltiples, e incluso en algunos casos contradictorias, sobre ciertos temas. Por lo tanto, la autoría, atribución y responsabilidad de cada capítulo recaen directamente en sus autores.

Es crucial señalar que, aunque este libro ofrece una visión panorámica de la reciente investigación en movilidad, incluye solamente una pequeña parte del conocimiento producido por la academia. En el listado de referencias al final de este apartado se podrá encontrar más publicaciones realizadas por el autor en colaboración con otros investigadores referentes a la movilidad en Cuenca.

Aun así, todavía hay muchos temas pendientes de exploración. La ciencia es un campo en constante evolución, pero confiamos en que la inercia ya generada y el alto nivel de colaboración entre los investigadores de Cuenca serán cruciales para abordar los futuros desafíos de la movilidad. Esta colaboración promete facilitar la generación de un conocimiento científico que sea no solo riguroso, sino también útil, oportuno y accesible.

Referencias y bibliografía complementaria

Abad, L., y Orellana, D. (2018). Análisis exploratorio de comportamientos de ciclistas voluntarios mediante minería de patrones espacio-temporales en Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 9(1), 141–151. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.13>

Armas, R., Aguirre, H., y Orellana, D. (2022). Evolutionary bi-objective optimization for the electric vehicle charging stand infrastructure problem. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1139–1146. <https://doi.org/10.1145/3512290.3528859>

Cardoso, M., Orellana, D., y Hermida, M. A. (2021). Tactical urbanism: collective interventions in urban public spaces. En *Sustainable Urban Development* (pp. 6–1 to 6–22). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3971-1ch6>

Guerrero, M., Orellana, D., Andrade, J., y Naranjo, G. (2020). Relation between Proximity to Public Open Spaces and Socio-economic Level in Three Cities in the Ecuadorian Andes. *6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 81–91. <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220%2f0009396600810091>

Guirao, B., y Orellana, D. (2021). New trends in urban mobility. En *Sustainable Urban Development* (pp. 4–1 to 4–17). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3971-1ch4>

Hermida, C. (2018). *La ciudad no se mueve sola*. Casa Editora Universidad del Azuay. <https://doi.org/10.33324/ceu-azuay.23>

Hermida, C., Cordero, M., y Orellana, D. (2019). Analysis of the influence of urban built environment on pedestrian flow in an intermediate-sized city in the Andes of Ecuador. *Interna-*

tional Journal of Sustainable Transportation, 13(10), 777–787.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1514445>

Hermida, M. A., Hermida, C., Cabrera, N., y Calle, C. (2015). La densidad urbana como variable de análisis de la ciudad: El caso de Cuenca, Ecuador. EURE. *Revista latinoamericana de estudios urbano regionales*, 41(124), 25–44. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612015000400002>

Martínez, I., Pulla, P., Tapia, D., y Orellana, D. (2016). Análisis del área de influencia de infraestructura de ciclismo urbano usando un enfoque de energía. En G. Olmedo (Ed.), *Congreso REDU 2016* (pp. 9–10). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

MOVERE y EMOV EP. (2013). *Estudio para la elaboración del plan de ciclovías urbanas y proyecto definitivo para la fase piloto y del estudio para el sistema de transporte público en bicicleta de la ciudad de Cuenca*.

Municipalidad de Cuenca. (1999). Ordenanza De Planificación, Organización y Regulación del Tránsito y Transporte Terrestres en el Cantón Cuenca, 90, Concejo Cantonal De Cuenca. <https://www.cuenca.gob.ec/node/8795>

Municipalidad de Cuenca. (2015). *Plan de movilidad y espacios públicos. Tomo I*, 540.

Orellana, D. (2011). Dime cómo te mueves y te diré quién eres: La movilidad como huella del comportamiento espacial de las personas. En J. R. Vaquero (Ed.), *Movilidad, retos y oportunidades para los profesionales de la Información y Comunicación* (pp. 32–45). Fundación Ciencias de la de Documentación. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5191.6645>

Orellana, D. (2016). Métodos para el análisis de patrones de movilidad no motorizada. En B. L. E. de Alvarez Cristina (Ed.), *Comunidades Urbanas Energeticamente Eficientes* (pp. 140–

148). http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/6802/1/Ver-sao%20digital_comunidades%20Urbanas%20energeticamente%20eficientes.pdf#page=140

Orellana, D., Bustos, M. E., Marín-Palacios, M., Cabrera-Jara, N., y Hermida, M. A. (2020). Walk'n'roll: Mapping street-level accessibility for different mobility conditions in Cuenca, Ecuador. *Journal of Transport and Health*, 16, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100821>

Orellana, D., y Guerrero, M. L. (2019). Exploring the influence of road network structure on the spatial behaviour of cyclists using crowdsourced data. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(7), 1314–1330. <https://doi.org/10.1177/2399808319863810>

Orellana, D., Neira, M., Guerrero, M. L., Samaniego, P., y Hermida, M. A. (2016). New geotools for urban studies. En C. Engel, E. Nico-Rodrigues, L. Bragança, y R. Mateus (Eds.), *SBE16 Brazil & Portugal Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment* (pp. 857–866). http://sbe16.civil.uminho.pt/app/wp-content/uploads/2016/09/SBE16-Brazil-Portugal-Vol_2-Pag_857.pdf

Orellana, D., y Quezada, A. (2018). *Mapeo móvil participativo para la planificación de ciclovías urbanas*. PUCE. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30580>

Orellana, D., Quezada, A., Andino, A., y Peralta, C. (2019). *eMAPS.ec: Herramienta para Evaluación a Microescala de Ambientes Peatonales (Adaptación a ciudades ecuatorianas)* (Versión 1). Universidad de Cuenca. https://github.com/llactalab/eMaps_Score_QGis_Plugin

Orellana, D., Quezada, A., Andrade, S., y Ochoa-Avilés, A. (2017). Metodología para definición de conglomerados de muestreo espacial en el entorno urbano basados en caminabilidad y factores socioeconómicos. *Proceedings of V Congreso REDU*, 487–491.

PADECO. (1999). *Plan para un sistema de tráfico sustentable para una ciudad piloto, Cuenca-Ecuador.*

Quezada, A., y Orellana, D. (2017). Detección de patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing. *Memorias Universidad del Azuay*, 367–373. <http://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/83>

Quinde, C., Guillermo, D., Siguenza-Guzman, L., Orellana, D., y Pesántez-Cabrera, P. (2020). A Software Architecture Proposal for a Data Platform on Active Mobility and Urban Environment. *Information and Communication Technologies*, 501–515. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62833-8_37

Prólogo

Acertadamente, Daniel Orellana, amigo y compilador de este libro sugiere que una ciudad se caracteriza por la forma cómo se mueve. Sin duda alguna, sus desplazamientos describen cómo esta ha sido pensada y producida y, asimismo, qué la privilegia con relación a las interacciones económicas, sociales y ecológicas. Precisamente, en las relaciones que la movilidad genera radica su complejidad y el interés de su análisis.

El caso de estudio es Cuenca, una ciudad intermedia, Patrimonio Cultural del Ecuador y de la Humanidad, catalogada por muchos como un buen lugar para vivir en función de sus indicadores socioeconómicos y la calidad de sus servicios, sistemas y espacios públicos. No obstante, en el ámbito de la movilidad, si bien la Ciudad ha dado importantes avances en las últimas décadas, a través de planes y proyectos concretos de movilidad sostenible, es necesario analizar si la planificación, la institucionalidad y los proyectos que se han implementado alcanzan a tejer una estrategia sólida de sostenibilidad para el presente y el futuro de la Ciudad.

En ese sentido, este libro ofrece algunas lecciones para académicos, tomadores de decisiones del ámbito público y privado, y ciudadanos interesados en la movilidad. En un primer momento, el recorrido histórico sobre la movilidad de Cuenca pone de manifiesto una desarticulación entre los planes de la urbe y los planes y políticas de movilidad sostenible; de hecho, en la práctica, la tasa de motorización se ha triplicado en las tres últimas décadas lo que da cuenta de un crecimiento que pone en duda la sostenibilidad deseada.

Para quienes somos responsables de las instituciones académicas rescato algunos puntos que deben llamar nuestra

atención. El primero, establecer estrategias para eliminar la evidente distancia que existe entre la investigación de alta calidad que producimos en las universidades y las instituciones gubernamentales que planifican y deciden sobre la movilidad de la Ciudad; estas investigaciones muchas veces se producen con recursos públicos y no cumple la finalidad de incidir en los cambios sociales. El segundo, en las universidades, esta investigación no necesariamente alimenta los contenidos de la formación de nuestros estudiantes, lo que significa que nuestros programas estarían desaprovechando gran parte de la novedad que se produce en cada campo disciplinar. El tercero, es la falta de diálogo entre investigadores, grupos de investigación o dependencias académicas intra e interuniversitarias; debido a que la mayoría de los estudios se obtienen en bases de datos costosas o incluso a las que algunas universidades no están suscritas, lo cual elitiza la investigación relevante realizada en nuestros contextos.

En relación con la movilidad de Cuenca, extraigo algunas reflexiones de las conclusiones en esta obra. En la dimensión social, niñas, niños, adultos mayores y personas con discapacidad continúan en alto riesgo en el espacio y el transporte público sin que se avizoren políticas locales de prevención de la inseguridad o cambios radicales en las dinámicas de movilidad y acceso al espacio público que reviertan esta problemática persistente. En la dimensión económica, las inversiones públicas continúan promoviendo el mercado de la movilidad motorizada; y, las inversiones en movilidad y transporte público de los últimos años estarían generando plusvalías que podrían recuperarse para invertir en movilidad sostenible. En la dimensión ecológica, las investigaciones expresan persuasivamente la necesidad de la transición hacia la electromovilidad y el transporte público eléctrico; la posibilidad de avanzar hacia la energía solar fotovoltaica de uso doméstico cuyos excedentes alimenten la red pública y los sistemas de movilidad sostenible; también, nos presentan alternativas tecnológicas para hacer más eficiente los sistemas tranviarios como el nuestro, la exploración de sistemas de reducción de la congestión vehicular aplicables a nuestros contextos y estrategias de descarbonización del transporte público.

A título personal, considero que el discurso de la sostenibilidad es fácilmente utilizable, maleable y banalizable en la política y en la sociedad; de manera que investigaciones rigurosas como las que producimos contribuyen a disputar las nociones de sostenibilidad de forma crítica y propositiva. En las ciudades se producen y reproducen las fuerzas del modelo económico dominante y sus lógicas presionan sobre la planeación y el crecimiento que separan cada vez más las ciudades de la naturaleza, en consecuencia, nos alejamos de la sostenibilidad. La movilidad sostenible tiene el potencial para reconectar a la gente con la gente y a la gente con la naturaleza.

Para finalizar, quiero elogiar el esfuerzo y trabajo de altísima calidad de 45 investigadores de las cuatro universidades de Cuenca y dos universidades extranjeras. Igualmente, no puedo dejar de resaltar que esta obra proviene de una serie de producciones científicas sobre la Ciudad dentro del grupo de investigación LactaLAB – Ciudades Sustentables, parte del Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca, al que orgullosamente pertenezco.

Contenido

Algunos desafíos actuales en la movilidad: género, entorno urbano y gestión del suelo	1
Carla Hermida Manuela Cordero	
Movilidad segura a la escuela: barreras y principales hallazgos	11
Adriana Quezada Daniel Orellana	
La movilidad en la periferia y su dependencia con la ciudad de Cuenca	27
Enrique Flores-Juca Jessica Chica Estefanía Mora-Arias	
La accesibilidad frente a distintas condiciones de movilidad	39
María Elisa Bustos Daniel Orellana Mateo Marín Natasha Cabrera Augusta Hermida	
Transporte público en Cuenca: línea base y oportunidades de mejora	49
Patricia Cazorla Elina Ávila-Ordóñez	
El sistema de <i>park and ride</i> en el entorno urbano de una ciudad media	67
Jairo Ortega János Tóth Tamás Péter Martín Ortega	

Sistema de transporte Bici Pública Cuenca: desafíos y oportunidades	81
Lisseth Molina Adriana Quezada Daniel Orellana	
Control energético tranviario usando hidrógeno y supercapacitores	93
Paúl Arévalo Antonio Cano Francisco Jurado	
Características y efectos de la movilidad motorizada en la ciudad de Cuenca	111
Néstor Rivera Juan Molina Andrea Bermeo Gina Novillo	
Transporte, energía y transición a la electromovilidad	125
Xavier Serrano-Guerrero Antonio Barragán-Escandón Esteban Zalamea-León	
Descarbonización del transporte en Cuenca	141
Gustavo Álvarez-Coello Andrés Baquero-Larriva Mateo Coello-Salcedo Daniel Cordero-Moreno Efrén Fernández-Palomeque Robert Rockwood-Iglesias Francisco Torres-Moscoso	

**Implementación masiva de medios de
electromovilidad en entornos urbanos y su
impacto en la red eléctrica**

Vinicio Iñiguez-Morán
Danny Ochoa-Correa
Juan Leonardo Espinoza

155

**La transición a la electromovilidad: una
perspectiva técnico-eléctrica**

Diego Morales Jadán
Marco Toledo Orozco
Javier Cabrera Mejía

173







Algunos desafíos actuales en la movilidad: género, entorno urbano y gestión del suelo

Carla Hermida  0000-0002-1095-7215

Manuela Cordero  0000-0001-5062-2447

Laboratorio de Movilidad Urbana – Universidad del Azuay

Puntos clave

- El transporte público, si bien es ampliamente utilizado en nuestra ciudad, se considera un espacio de riesgo, principalmente para las mujeres.
- Proyectos urbanos vinculados a la movilidad pueden provocar cambios en la dinámica inmobiliaria.
- Aspectos del entorno y el tejido urbano, así como características demográficas como el género, inciden en las prácticas de movilidad.

Introducción

Como parte del discurso de la sostenibilidad urbana que arranca a finales del siglo XX, se cambia del paradigma del transporte al de la movilidad. Esto ha obligado a investigadores y técnicos a estudiar a profundidad sobre la movilidad no motorizada y el transporte público, como respuesta a los fuertes impactos negativos provocados por las ciudades dependientes del automóvil.

Así también, se ha evidenciado en las últimas décadas que algunos proyectos vinculados con la movilidad urbana (sistemas de transporte público, ciclovías, peatonalizaciones, etc.),

son catalizadores de transformación, tanto positiva como negativa, en sus entornos. Un ejemplo de ello, son los cambios en la dinámica inmobiliaria alrededor de estos proyectos.

En este contexto, a continuación, se recogen los principales resultados de los estudios realizados, en los últimos 5 años, por algunos miembros del Laboratorio de Movilidad Urbana de la Universidad del Azuay en Cuenca. Los temas expuestos se organizan de la siguiente manera: 1) hallazgos relacionados con el transporte público y 2) hallazgos relacionados con la movilidad no motorizada.

Los artículos científicos con sus objetivos, enfoque metodológico e instrumentos incluidos en este documento se detallan en la Tabla 1. Cada uno de ellos demuestra la gran diversidad de temáticas y maneras de estudiar el fenómeno de la movilidad urbana en una ciudad.

Sobre el transporte público

2

En el artículo 1, sobre género y movilidad en la comunidad de la Universidad del Azuay, se destaca como resultado de las encuestas que los estudiantes utilizan el transporte público como su principal forma de movilidad cotidiana, seguido muy de cerca por el vehículo privado. En el caso de las estudiantes mujeres, un 48,4 % utiliza el transporte público, frente al 40,3 % que se movilizan en vehículo privado. En el caso de los estudiantes hombres, un 38,7 % de ellos utiliza el transporte público, frente al 37,8 % que utilizan el vehículo privado (Hermida et al., 2023).

Con respecto a la seguridad, los análisis estadísticos permitieron validar la hipótesis de que existen diferencias significativas entre hombres y mujeres acerca del grado de preocupación sobre la seguridad en el transporte público sobre el acoso ($p < 0,001$) y la delincuencia ($p = 0,042$), no así con respecto a la accidentabilidad ($p = 0,228$). Tanto hombres como mujeres, al ser consultados sobre su percepción relacionada a la seguridad de sus viajes, el transporte público tiene sus porcentajes más altos en "insatisfactoria" o "muy insatisfactoria" (Hermida et al.,

2023). Los resultados cualitativos validaron los cuantitativos, ya que el transporte público fue mencionado varias veces en las entrevistas como un espacio de riesgo para las mujeres.

En el artículo 2, presentamos un estudio sobre las relaciones entre la preferencia residencial y la preferencia de modos de desplazamiento en Cuenca, a través del método Q. El método Q "utiliza herramientas cualitativas y cuantitativas para realizar un estudio sistemático de la subjetividad implícita en las perspectivas de los participantes de un grupo, a partir de una técnica de ordenación de afirmaciones y de análisis factorial" (Orellana et al., 2022, p.3). En este estudio se encontraron tres discursos: un discurso orientado a la movilidad activa, otro orientado al transporte público y finalmente, uno orientado a la exclusividad y autosegregación. Con respecto al discurso en el cual los participantes mostraban preferencia por el transporte público, y por barrios bien conectados y con diversidad de usos, resulta un aspecto de análisis el hecho de que estos pertenecían principalmente a niveles socioeconómicos medios y bajos.

Sobre la incidencia del transporte público en la dinámica inmobiliaria, los artículos 3 y 5, estudian al sistema tranviario de Cuenca en el tramo de la Av. De las Américas (Hermida et al., 2018; Hermida et al., 2020). Es importante indicar que la información de estos dos artículos fue levantada en el 2017, durante la construcción del tranvía, es decir, antes de que entrara en operación. Al ser el tranvía la primera experiencia de un sistema de esta naturaleza en la ciudad, estos estudios tuvieron un carácter exploratorio. Se encontró que en la fecha en la cual se recogieron los datos a través de llamadas telefónicas y anuncios de periódico, el precio de arriendo de las viviendas aumentaba mientras más se alejaba del recorrido tranviario; mientras que el precio de arriendo de los inmuebles de uso comercial tenía una relación inversa con la distancia al eje del tranvía. Para los valores relacionados con la venta de inmuebles no se encontraron respuestas estadísticamente significativas (Hermida et al., 2018). Estos resultados se complementaron con el análisis de las percepciones de los propietarios sobre lo que sucedería con el valor de sus bienes por el paso del tranvía una vez que estuviese operando; "el 84,9 % considera que lo vendería al mismo

Tabla 1. Artículos académicos utilizados, por fecha de publicación descendente

#	Autores	Título	Año	Revista	Objetivo	Materiales y métodos
1	Hermida, C., Cor-dero-Salcedo, M., Eljuri, G., Fajardo, G., y Serrano-Fernández de Córdova, E	Género y movilidad cotidiana en una comunidad universitaria en Cuenca-Ecuador	2023	ESTOA	Encontrar la relación entre género y movilidad cotidiana en la Universidad del Azuay	Caso de estudio: Universidad del Azuay Enfoque metodológico: mixto Instrumentos: encuesta digital y entrevista semiestructurada
2	Orellana, D., Hermida, C., y Hermida, M. A.	Cerca o lejos? Cursos y subjetividad en las relaciones entre el lugar de residencia y la movilidad	2022	EURE	Analizar el vínculo entre las preferencias de residencia y de los modos de desplazamiento de las personas en el caso de Cuenca	Área de estudio: Cuenca Enfoque metodológico: mixto Instrumento: método Q
3	Hermida, C; Freire, A; Moreno, D; Tonon, L;	Percepción sobre la fluctuación de valores inmobiliarios causada por la implementación de un nuevo sistema de transporte público	2020	AUS	Conocer la percepción que tienen los propietarios sobre el avalúo de sus inmuebles de vivienda, tomando en consideración el futuro paso del tranvía de Cuenca cerca de sus propiedades	Caso de estudio: tramo Av. Américas del tranvía de Cuenca Enfoque metodológico: cuantitativo Instrumento: cuestionario a dueños de vivienda en área de influencia

#	Autores	Título	Año	Revista	Objetivo	Materiales y métodos
4	Hermida, C., Orellana, D., Cordero, M.	Analysis of the Influence of the Urban Built Environment on Pedestrian Flow in an Intermediate-Sized City in the Andes of Ecuador		International Journal of Sustainable Transportation	Investigar la relación entre variables relacionadas al entorno urbano con el flujo peatonal en Cuenca	Área de estudio: Cuenca Enfoque metodológico: cuantitativo Instrumento: ficha de levantamiento físico espacial de los tramos y conteos peatonales
5	Hermida, C., Moreno, D., Pacheco, D., Tonon, L., Cortés, A	Impacto en el valor de ventas y arriendos de inmuebles con uso residencial y comercial provocado por la implementación de un sistema tranviario en la ciudad de Cuenca, Ecuador	2018	Revista 180	Determinar el impacto en los valores inmobiliarios por la implementación del tranvía en Cuenca	Caso de estudio: tramo Av. De las Américas del tranvía de Cuenca Enfoque metodológico: cuantitativo Instrumento: levantamiento de valores históricos de arriendo y ventas a través de revisión de periódicos. Levantamiento de datos actuales a través de llamadas a ofertantes

valor, lo que evidencia una percepción de que el tranvía no generará un incremento en los valores inmobiliarios. Tan solo un 13,2 % de los encuestados piensa que su inmueble costaría más con el tranvía en operación” (Hermida et al., 2020, p.65).

La pertinencia de estas investigaciones radica en el hecho de que la literatura demuestra que sistemas de transporte público como metros, tranvías, buses de tránsito rápido (BRT), entre otros, tienen una incidencia sobre la dinámica inmobiliaria, particularmente en lo que respecta a los valores de arriendo y de venta de las propiedades. Será de fundamental importancia que se realicen nuevas investigaciones con el tranvía ya en operación para comprobar si ha existido variación en los resultados obtenidos en el 2017. Sin embargo, se puede intuir por la publicidad inmobiliaria en los alrededores, colocada posterior al inicio de la operación del tranvía, que se ha generado un incremento en los valores de ventas y arriendos; ya que los anuncios publicitarios promocionan a los proyectos inmobiliarios con la cercanía al tranvía como un atributo positivo.

9

Sobre la movilidad no motorizada

En algunos de estudios abordamos la temática de la movilidad no motorizada de manera directa, tal es el caso del artículo 4, que estudia la relación entre el entorno construido y el flujo peatonal en Cuenca (Hermida et al., 2019); y, en otros casos, de manera indirecta como en el artículo 1, sobre género y movilidad en la comunidad de la Universidad del Azuay (Hermida et al., 2023), y el 2, sobre la relación entre las preferencias de lugar de residencia y de modo de desplazamiento (Orellana et al., 2022).

En el artículo 4 se realizaron conteos peatonales y se cruzaron esos resultados con características, levantadas a través de fichas físico-espaciales, del entorno construido. Al aplicar coeficientes de regresión binomial negativos para el modelo completo, se encontró que hay un mayor flujo peatonal principalmente cuando existe restricción de parqueo en la calle, las edificaciones no tienen retiro frontal, las veredas son más an-

chas, y existe un mayor número de puertas hacia la calle (Hermida et al., 2019).

En el artículo 2, en el cual se aplica el método Q para conocer los discursos sobre preferencias residenciales y su relación con su elección en cuanto a modos de desplazamiento, el primer discurso encontrado es justamente aquel orientado a la movilidad no motorizada. Se evidenció que para los participantes identificados con este discurso "la movilidad es más importante que la tipología de vivienda o el tejido urbano"; pero recalcan la importancia de la conectividad, las veredas y el verde urbano en los barrios de su preferencia (Orellana et al., 2022, p 16). Los participantes que determinaron este discurso fueron mayormente hombres, adultos jóvenes, sin hijos, y de estratos socioeconómicos medios y altos.

En el texto 1, sobre género y movilidad en la Universidad del Azuay, se encontró, con respecto a la movilidad no motorizada, que es muy reducido el número de miembros de la comunidad que se desplazan a pie o en bicicleta, lo cual no permitió su análisis estadístico. Sin embargo, en su parte cualitativa, el estudio muestra que las mujeres expresan temor al caminar solas en la calle, y que, tanto los entrevistados hombres como mujeres reconocen una mayor vulnerabilidad de las mujeres en el espacio público. Fue interesante comprobar que existe una diferenciación entre cómo los padres organizan (o autorizan) la movilidad de los hijos varones versus la de las hijas mujeres, lo cual incide en el poco uso de la movilidad no motorizada por parte de las estudiantes (Hermida et al., 2023)

Conclusiones

Los textos analizados aportan al cuerpo teórico y metodológico sobre transporte público y movilidad no motorizada en el contexto de una ciudad intermedia latinoamericana. Pero también, dejan nuevos retos para la academia y los gobiernos locales.

Para la academia quedan retos como el realizar estudios comparativos entre ciudades, entre casos, entre grupos po-

blacionales, etc. Así también, el desafío será procurar vincular instrumentos cuantitativos y cualitativos en los proyectos de investigación, ya que eso permite una mayor profundización en los fenómenos urbanos.

Es importante mencionar, la necesidad de actualizar permanentemente datos y tendencias con respecto a los impactos de proyectos urbanos vinculados a la movilidad y el transporte. A manera de ejemplo, será fundamental analizar la dinámica inmobiliaria con el tranvía ya en operación.

Para los gobiernos locales, el reto es principalmente lograr un verdadero cambio en la pirámide de la movilidad. Desde el nivel político, el discurso de autoridades y técnicos se alinea con la movilidad sustentable, sin embargo, en la práctica, aún se dejan grandes montos en los presupuestos municipales para la inversión en movilidad motorizada privada (ej: distribuidores de tráfico), y pocos recursos para, por ejemplo, ensanchamiento de veredas, implementación de ciclovías, señalización de carriles exclusivos para el transporte público, etc.

Así también, en materia de política pública que favorezca a la movilidad no motorizada, se debe pensar más allá de las infraestructuras. A manera de ejemplo, los planes urbanos deben contemplar estrategias para evitar situaciones que inhiben los desplazamientos en modos activos, tales como los condominios cerrados, los muros ciegos y, sobre todo, las grandes distancias producidas por la expansión innecesaria de la ciudad.

Finalmente, los gobiernos locales, podrían ahondar en estudios sobre el impacto de los proyectos urbanos de transporte sobre la dinámica inmobiliaria, para que, en caso de existir un incremento de plusvalías como producto de su implantación, estas puedan recuperarse para ser reinvertidas en mejores condiciones de movilidad para los cuencanos.

Referencias

Hermida, C., Cordero, M., Eljuri, G., Fajardo, G., y Serrano, E. (2023). Género y movilidad cotidiana en una comunidad

universitaria en Cuenca-Ecuador. *Estoa. Revista de La Facultad de Arquitectura Y Urbanismo de La Universidad de Cuenca*, 12(23), 24–43. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-92742023000100024&script=sci_arttext

Hermida, C., Cordero, M., & Orellana, D. (2019). Analysis of the influence of urban built environment on pedestrian flow in an intermediate-sized city in the Andes of Ecuador. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1514445>

Hermida, C., Freire, A., Moreno, D., y Tonon, L. (2020). Percepción sobre la fluctuación de valores inmobiliarios debido a un nuevo sistema de transporte. *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad]*, 28, 61–68. <https://doi.org/10.4206/aus.2020.n28-08>

Hermida, C., Moreno, D., Pacheco, D., Tonón, L., y Cortés, A. (2018). Impacto en el valor de ventas y arriendos de inmuebles con uso residencial y comercial, provocado por la implementación de un sistema tranviario en la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Revista 180*, 0(42). [https://doi.org/10.32995/rev180.Num-42.\(2018\).art-576](https://doi.org/10.32995/rev180.Num-42.(2018).art-576)

Orellana, D., Hermida, C., y Hermida, M.-A. (2022). ¿Cerca o lejos? Discursos y subjetividad en las relaciones entre el lugar de residencia y la movilidad. *EURE. Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, 48(144), 1–24. <https://doi.org/10.7764/eure.48.144.15>



Movilidad segura a la escuela: barreras y principales hallazgos

Adriana Quezada^{1,2}  0000-0002-2335-8422

Daniel Orellana^{1,2}  0000-0001-8945-2035

¹ LlaCtaLAB-Ciudades Sustentables, Departamento Interdisciplinario del Espacio y Población, Universidad de Cuenca, Ecuador.

² Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Puntos clave

- La percepción parental de inseguridad del espacio público limita la movilidad a pie o en bicicleta de las infancias.
- El espacio público dificulta una caminata comfortable, lúdica y acompañada de los niños en su camino a la escuela.
- Para los niños la presencia de vegetación en el espacio público es fundamental para una caminata divertida y comfortable.
- Las estrategias de urbanismo táctico trascienden poblaciones y territorios, propiciando la cohesión social.

11

Introducción

Hasta el 2030 las naciones tienen el reto de instaurar un desarrollo urbano inclusivo y sostenible que garantice el acceso seguro de la población—y sobre todo de los más vulnerables—a los bienes y servicios de la ciudad, a ambientes urbanos saludables (Naciones Unidas, 2018). En este contexto, y siguiendo las

tendencias mundiales, en Latinoamérica se realizan significativos esfuerzos para propiciar que niños y niñas sean beneficiarios de este propósito.

A nivel mundial la población infantil de zonas urbanas presenta una tendencia creciente de obesidad y de sobrepeso, y del uso desmedido de medios motorizados (vehículo, buses, entre otros) en sus rutas cotidianas. Estas tendencias son alarmantes, debido a que perjudican la salud de los infantes y coartan el acceso a los beneficios implícitos que tiene el movilizarse a pie o en bicicleta en su desarrollo y la sociedad. Por estos motivos, una serie de estudios se han enfocado en los entornos escolares y en los medios de transporte que utilizan los niños en sus rutas a la escuela (Hermida et al., 2021).

Los entornos escolares, al ser los espacios cotidianos con los que interactúan las infancias, representan una oportunidad para fomentar la actividad física, la interacción social y el desarrollo cognitivo, así como de sus capacidades y aptitudes. Estos son lugares clave para intervenciones que instauren condiciones urbanas que permitan el juego, el caminar y la exploración, es decir, comportamientos naturales de la niñez. Varios estudios, realizados en diferentes ciudades del mundo, han evidenciado que, para alcanzar estos objetivos, es necesario superar algunos obstáculos. Entre los principales se encuentran: i) el tráfico y volumen vehicular; ii) la inseguridad vial y personal; iii) la distancia entre la casa y la escuela, y iv) las percepciones parentales acerca de la movilidad de los niños y niñas en la ciudad (Hermida et al., 2021).

En el caso de Cuenca, generar este conocimiento base es fundamental para marcar las pautas de una planificación urbana que prevea y mitigue los procesos de segregación social especialmente de las infancias, entendiendo que la priorización del derecho a la ciudad de los niños es garantía de un entorno inclusivo, cohesionado y saludable.

En el presente capítulo se abordan los resultados y reflexiones de las investigaciones llevadas a cabo por el grupo de investigación LlactaLAB, del Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca, y aborda la evaluación, análisis, rediseño e intervenciones de urbanismo

táctico en entornos escolares de escuelas públicas en Cuenca, desde el 2019 hasta el 2023. Estas investigaciones se enfocaron en conocer la relación de los factores sociales, individuales y del entorno urbano con la movilidad a pie y en bicicleta de los niños y niñas hacia la escuela, y en proponer y evaluar estrategias de transformación del espacio público para mejorar las condiciones de caminabilidad.

Contexto

En el cantón Cuenca existen aproximadamente 389 escuelas; 209 se localizan en la zona urbana, de las cuales el 55 % son particulares y el 45 % son públicas (Ministerio de Educación, s.f.). La planificación estatal procura que los niños y niñas que opten por la educación pública asistan a escuelas cercanas a su vivienda, lo que les da la oportunidad de: i) recorrer distancias más cortas en su trayecto a la escuela, ii) movilizarse a pie o en bicicleta y iii) consecuentemente, incrementar sus niveles de actividad física. Sin embargo, en la práctica, una considerable proporción de los niños vive a grandes distancias de sus escuelas.

En Cuenca, en el 2022, más de cien mil niños y niñas entre 3 y 11 años, se desplazaron cotidianamente hacia y desde la escuela, 200 días del año para ser precisos (Ministerio de Educación, s.f.). En estos itinerarios, los niños experimentan y afrontan un entorno urbano diseñado para adultos, pero desde una perspectiva visual que no sobrepasa los 120 cm sobre el nivel del piso (Figura 1) (Freire et al., 2014).

La ciudad, pese a sus bondades, presenta condiciones de riesgo para la movilidad y la presencia de niños en el espacio público, ya sea que estén acompañados o de manera autónoma. Por un lado, Cuenca evidencia un descontrolado crecimiento del parque automotor, con cerca de 145 000 vehículos recorriendo la ciudad cada día (Beltran, 2023), lo que genera problemas de congestión vehicular, aumento de la siniestralidad y de emisiones contaminantes y deterioro de la calidad de la vida urbana. Por otro lado, el diseño de las aceras de su espacio público



Figura 1. Niños intentando cruzar la Av. Cristóbal Colón, vía principal de acceso a la Unidad Educativa Nicolás Sojos, Cuenca. Ecuador. Fotografía: Martín Cardoso.

14

no garantiza la caminabilidad segura y accesible, así perjudica a personas con discapacidades físicas y a aquellas que en su itinerario cuidan o son cuidadas por otras personas (Orellana et al., 2020).

La perpetuidad de estas condiciones es preocupante, sobre todo en Ecuador, donde la principal causa de muerte en niños entre 5 y 14 años son los accidentes de tránsito y lesiones, más del 50% han sucedido siendo peatones y ciclistas (INEC, 2022).

Vivencia de la hora escolar

El congestionamiento vehicular en las horas de entrada y salida de las escuelas podría ser descrito como caótico, lo que genera frecuentes quejas y reclamos por parte de los conductores. Sin embargo, poco se ha dicho acerca de cómo, estos momentos críticos, impactan en la seguridad de la comunidad educativa.

Los vehículos se estacionan en doble fila o en lugares prohibidos para dejar o recoger a los estudiantes, o incluso se detienen en los carriles de circulación. Las aceras, generalmente estrechas, se ven desbordadas, obligando a muchos a caminar por la calzada, situación que empeora con la presencia de obstáculos y ventas ambulantes. Los tutores y niños que esperan la apertura de las puertas de la escuela permanecen de pie o sentados en bancas improvisadas, expuestos muchas veces al temporal. Finalmente, la concentración de gases contaminantes emitidos por los vehículos sobrepasa los límites aceptables para la salud humana y el ruido de las bocinas es aturdidor.

Frente a estos problemas, muchas unidades educativas han tenido que buscar formas de mitigar, dentro de lo posible, sus impactos. En algunas escuelas, profesores y tutores (padre, madre, tía, u otra persona adulta) se organizan, por la mañana y al medio día, en brigadas para controlar el tránsito vehicular y resguardar a los niños al cruzar las calles en su camino hacia las puertas de la escuela; con chalecos reflectivos, señales de "PARE", y algunos conos de seguridad, orientan y ordenan a los vehículos. Los vendedores ambulantes y los comercios que se han establecido en los predios inmediatos a la escuela se vuelven puntos de atracción que promueven interacciones humanas, generando en algunos casos un sentido de lugar y de pertenencia.

Caminar en "fila india"

La norma que regula las características del espacio público urbano determina que las aceras deben tener un ancho libre (sin obstáculos) de 1,20 m para la circulación de una sola persona; y de 1,80 m para la circulación de dos personas en sillas de ruedas que transitan en direcciones opuestas (INEN Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2016). De acuerdo con nuestra investigación, en Cuenca, el 70 % de aceras en el entorno escolar inmediato, tienen un ancho entre 1,20 m y 2,40 m; el 43 % son aceras menores a 1,80 m; y el 17 % tiene un ancho mayor a

2,40 m; los anchos predominantes son de entre 1,50 m y 2 m. Sin embargo, esas dimensiones no representan el ancho libre, pues encontramos que el 37 % de aceras presenta obstáculos que obligan al peatón a abandonar la acera para continuar su recorrido por la calzada.

Esto implica que muchas de las aceras de los entornos escolares solo permiten caminar en “fila india”, impidiendo la caminata en parejas o grupos que son fundamentales para la seguridad. Tampoco acogen lugares de descanso o paradas temporales; menos aún la caminata holgada, lúdica y acompañada que requieren los niños y niñas en su camino a la escuela. Las actividades y comportamientos que generan los entornos escolares, requieren aceras de un ancho libre que permita al menos a tres o cuatro personas caminar juntas.

De acuerdo con el análisis realizado con la herramienta e-MAPS.ec (Orellana et al., 2021) las condiciones de caminabilidad en los entornos escolares también son deficientes, debido principalmente al deterioro de las aceras, la presencia de obstáculos, la falta de continuidad entre elementos de la infraestructura peatonal (rampas y señalización), intersecciones mal resueltas y la carencia de elementos paisajísticos. Es importante notar, que para los niños y niñas que se movilizan a pie, la presencia de vegetación en sus trayectos es el principal factor que haría del caminar hacia y desde la escuela, una experiencia confortable y divertida.

20 km/h que salvan vidas

Extender o agrandar las aceras para acoger las actividades del entorno escolar, conlleva otros beneficios. Por un lado, contribuye a la pacificación de las calles; disminuye el ancho de los carriles vehiculares y consecuentemente la velocidad a la que transitan. Por otro lado, el espacio se limita para la ejecución de maniobras de rebasamiento o de retorno de los conductores y ocasiona que las estancias vehiculares, en calles restringidas para el estacionamiento, sean breves. También favorece a dis-

minuir la distancia de cruce de los pasos peatonales. Los niños al caminar a menor velocidad que los adultos, requieren más tiempo para recorrer una distancia y por lo tanto más elementos de control que garanticen su cruce.

Pese a que la legislación ecuatoriana estableció en zonas escolares una velocidad máxima de 20 km/h, las condiciones y diseño del entorno urbano no favorecen a su cumplimiento. De acuerdo con el *Manual de Seguridad Vial Urbana del Ecuador*, en zonas donde la velocidad permitida es de 30 km/h o menor, se recomienda carriles vehiculares de 2,70 m de ancho, y en el caso de que el carril sea compartido por vehículos y buses, de 3 m (Agencia Nacional de Tránsito, 2021). Sin embargo, en los entornos escolares de Cuenca, el 83 % de calles tienen un ancho mayor a 6 m, con anchos recurrentes de 7 y 8 m con la presencia de 2 carriles. Estos anchos equivalen a la distancia más corta que generalmente los niños tienen que recorrer para cruzar la calle, misión que se dificulta aún más por la carencia de semáforos vehiculares y peatonales en el 87 % de las intersecciones de los entornos escolares.

Elección del medio de transporte

La elección del medio de transporte en el que se movilizan los niños y niñas hacia y desde la escuela depende principalmente de la decisión de sus tutores. En esta decisión entra en juego su juicio de valor sobre el movilizarse en la ciudad, la situación socioeconómica del hogar y la conveniencia cotidiana.

En general, en Cuenca, los tutores temen que los niños se trasladen a pie, en bicicleta o en bus, debido a una alta percepción de inseguridad ante la delincuencia, el tráfico vehicular y las deficiencias del espacio público. Se ha observado en los entornos escolares que una gran cantidad de niños se movilizan acompañados de una persona adulta; muy pocos lo hacen de manera independiente o acompañados de otros niños.

Por otra parte, pese a que la distancia es un factor determinante al momento de decidir cómo moverse, se ha con-

firmado que los niños de nivel socioeconómico bajo tienden a caminar a la escuela más que los niños de nivel socioeconómico medio y alto. En estos dos últimos estratos, los tutores prefieren que los niños se movilicen a la escuela en auto privado y/o en transporte escolar, sin importar la distancia a la que se encuentre la escuela (Ballari et al., 2021). Su elección está ligada al hecho de garantizar una movilidad segura y a la conveniencia horaria de acuerdo con las dinámicas familiares. En cambio, para los niños de nivel socioeconómico bajo, debido a una economía familiar en la que moverse diariamente en transporte público puede ser inasequible, caminar a la escuela representa su única opción.

Urbanismo táctico

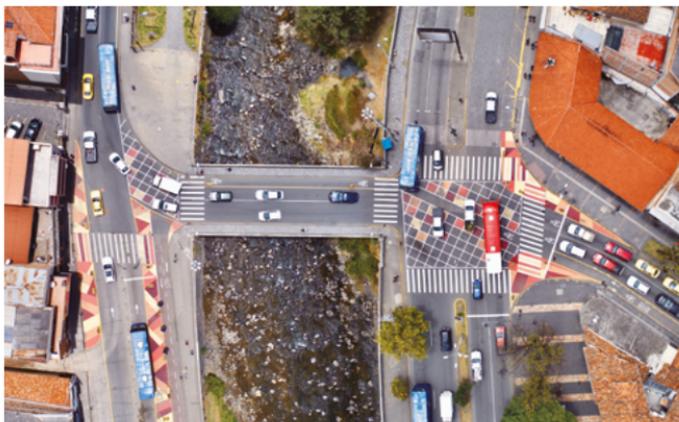
Una vez entendidos los factores sociales, individuales y del entorno urbano que afectan la movilidad cotidiana a la escuela, desarrollamos propuestas para adaptar el diseño del espacio público hacia entornos escolares seguros en varias escuelas de la ciudad. Estas ideas se implementaron como prototipos mediante intervenciones de urbanismo táctico, a fin de evaluar si generaban cambios en el comportamiento y percepción de las personas que usan el espacio: niños y niñas, profesores, tutores, vecinos, transeúntes, entre otros (Cardoso et al, 2021).

El urbanismo táctico, consiste en un proceso participativo de recuperación y mejoramiento del espacio público mediante el uso de elementos temporales y asequibles (ONU-Habitat, 2021). Se basa en intervenciones temporales, ágiles y flexibles, que son monitoreadas, evaluadas, ajustadas y nuevamente monitoreadas para comprobar que generen los efectos buscados para mejorar la vivencia del espacio público escolar. Cada propuesta integró diferentes soluciones de diseño urbano como ensanchamiento de aceras, disminución del ancho del carril vehicular, disminución de la longitud de pasos cebras, incorporación de señalización (horizontal y vertical), vegetación y bancas.

Las propuestas fueron monitoreadas luego de su implementación para evaluarlas. Se observó que la velocidad del tránsito vehicular disminuyó y se ordenó. Varios vehículos se desviaron hacia otras calles y otros realizaban paradas rápidas para no obstaculizar. Se detectaron menos conflictos y el ruido de las bocinas prácticamente desapareció. El espacio peatonal acogió de manera más cómoda el tránsito de los niños y sus tutores, incluso de actividades de juego como la rayuela y el uso de la bicicleta. También las bancas fueron utilizadas para sentarse y descansar pese a la ausencia de sombra. Las zonas en donde se localizan los vendedores ambulantes y sus pequeños clientes finalmente estuvieron dentro de los límites del espacio público peatonal. Al disminuir la velocidad y la longitud de los pasos peatonales, los niños lograban pasar sin prisa de una acera a otra y eran más visibles en el espacio público. Así también las brigadas de la escuela pudieron realizar su trabajo con mayor facilidad (Figura 2).



Figura 2. Escolares utilizan el ensanchamiento de acera realizada en la implementación de urbanismo táctico en la Unidad Educativa Luis Cordero Crespo. Cuenca, Ecuador. Fotografía: María Clara Vásquez.



Es interesante notar que las soluciones responden inicialmente a un proceso participativo entre los actores del entorno escolar, los tomadores de decisiones (con jurisdicción en la movilidad urbana) y el equipo de investigación. Sin embargo, a medida que se evalúa la intervención, genera una serie de reacciones, fricciones e interacciones entre propios y extraños, que cohesiona y nos motiva a entablar conversaciones y



Figura 3. Intervención de Urbanismo Táctico en el Puente del Vado.
Fotografías: LlactaLAB, Matías Cardoso, Daniel Orellana.

discusiones, posicionando la problemática y la solución en el discurso de la gente, e inclusive, en otros entornos escolares de la ciudad.

Ante los resultados positivos de experimentar el “nuevo” espacio público escolar, se aspira—como es propio del urbanis-

mo táctico—a que las soluciones se implementen de manera definitiva con infraestructura de calidad.

El proceso nos ha permitido estudiar la conveniencia del urbanismo táctico como una herramienta de prototipado urbano, siempre y cuando se lo aborde tomando en cuenta algunas consideraciones: debe ser *participativo* (involucrar a la población que va a usar el espacio), *experimental* (buscar probar posibles soluciones), *adaptable* (permitir realizar cambios y ajustes sobre la marcha), *atractivo* (mejorar el paisaje urbano y la estética), *de bajo costo* (utilizar materiales y elementos disponibles y económicos) y *temporal* (planificar un tiempo de duración determinado, luego de lo cual debe ser retirado o reemplazado con infraestructura más permanente). Así mismo, vale la pena resaltar que, sin estas características, las estrategias de urbanismo táctico pierden su potencial e incluso pueden volverse contraproducentes, transmitiendo una idea limitada a lo barato y de mala calidad.

Conclusiones

Dignificar la vida urbana de la población infantil, sin duda es el eslabón que edifica la ciudad inclusiva y sostenible del siglo XXI. Para este fin, la planificación urbana no debe desestimar aquellos factores que se evidencian como inhibidores del derecho a la movilidad segura de los niños y niñas en la ciudad.

El congestionamiento y volumen vehicular que actualmente existe en la zona urbana, más un espacio público carente de condiciones adecuadas para la movilidad de los infantes, repercute drásticamente la posibilidad de que los niños y niñas se movilicen cotidianamente a pie o en bicicleta, de manera segura y saludable. Muchas familias, en búsqueda de mayor seguridad de los escolares, contribuyen a agudizar estas problemáticas al verse obligadas a utilizar el vehículo privado como medio de transporte frente a la falta de opciones adecuadas.

Los adultos son conscientes del riesgo al que actualmente se exponen los niños en el entorno escolar y comprenden la

necesidad y el impacto de intervenir en el control y orden del espacio público a diario. De ahí se evidencia la necesidad de que los entornos escolares sean reconocidos, no solo como un lugar de instrucción, sino también como el espacio idóneo y óptimo para estimular los procesos de desarrollo de los niños en su vida cotidiana. También, es fundamental reconocer que no es suficiente un espacio público que acoge únicamente el tránsito, sino aquel que invita al disfrute, es decir, a la posibilidad de caminar de manera lúdica, de contemplar, de permanecer estacionados, de interactuar con otras personas, como lo evidenció la ampliación de aceras realizada durante las intervenciones de urbanismo táctico. Como lo señala Bourke (2017), estas experiencias crean en los niños un sentido de pertenencia e identidad con la ciudad.

El urbanismo táctico, también puede ser el catalizador para generar una percepción positiva sobre los entornos escolares. Al fin y al cabo, las intervenciones que implementamos en Cuenca dan continuidad a las acciones emprendidas por las brigadas de profesores y tutores, y agregan un insumo fundamental que es la evidencia técnica y científica. Esta evidencia favorece a identificar con rigurosidad las principales barreras, problemáticas y soluciones de un contexto escolar específico. Además de ser un proceso cohesionador, es replicable y apoya a la toma de decisiones.

Los resultados de esta investigación son la base para indagar en nuevos cuestionamientos. Por una parte, nos plantea el entender las razones y motivaciones que inciden en la percepción de los tutores sobre el caminar o ir en bicicleta por la ciudad. Posiblemente el contexto de inseguridad por el que actualmente atraviesa el país sea el aspecto prioritario que guía esa percepción. Sin embargo, se debe tratar de profundizar en entender el nivel de experimentación del espacio público al que los tutores han sido expuestos cotidianamente, a fin de identificar estrategias que les permita obtener una percepción asentada en la realidad de su entorno, y que les brinde la capacidad de experimentar los beneficios de la movilidad a pie y en bicicleta.

Por otra parte, no se ha profundizado en la repercusión que el tráfico vehicular tiene en la contaminación ambiental de los entornos escolares. Esta investigación sí analizó este aspec-

to, de hecho, se identificó que los niveles de contaminación en estos espacios superan los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la norma ambiental nacional vigente. Sin embargo, es necesario realizar mediciones contextualizadas al individuo del estudio, pues se desconoce el nivel de exposición al que se someten las infancias al transitar junto al tráfico vehicular y el impacto que esta tiene en la salud de la niñez en Cuenca.

Referencias

Agencia Nacional de Tránsito. (2021). *Manual de Seguridad Urbana del Ecuador–Catálogo Práctico–Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador–ANT*. https://www.ant.gob.ec/manual-de-seguridad-vial-urbana-de-ecuador-2/manual-de-seguridad-vial-urbana-de-ecuador-catalogo-practico/#cat_7

Ballari, D., Salgado-Castillo, F., Hermida, C., Orellana, D., y Hermida, M. A. (2021). Modos De Movilidad De Los Niños Y Niñas En Edad Escolar: Exploración De La Incidencia De Factores Socioeconómicos, De Percepción Y De Mesoescala Urbana Utilizando Random Forest. *Universidad-Verdad*, (79), 44–58. <https://doi.org/10.33324/uv.vi79.381>

Beltran, J. (1 de enero de 2023). *El próximo alcalde de Cuenca deberá lidiar con el caos vehicular y la inseguridad*. Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/seccionales-2023/retos-proximo-alcalde-cuenca/>

Bourke, J. (2017). Children’s experiences of their everyday walks through a complex urban landscape of belonging. *Children’s Geographies*, 15(1), 93–106.

Cardoso, M., Orellana, D. y Hermida, M.A. (2021). “Tactical urbanism: collective interventions in urban public spaces”. En

Sustainable Urban Development, 6–1 to 6–22. 2053-2563. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3971-1ch6>.

Freire, W. B., Ramírez-Luzuriaga, M. J., Belmont, P., Mendieta, M. J., Silva-Jaramillo, M. K., Romero, N., Sáenz, K., Piñeiros, P., Gómez, L.F., y Monge, R. (2014). *Tomo I: Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de la población ecuatoriana de cero a 59 años. ENSANUT-ECU 2012*. Ministerio de Salud Pública/Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/ENSANUT/MSP_ENSANUT-ECU_06-10-2014.pdf

Hermida, C., Naranjo, G., Peña, J., Quezada, A., y Orellana, D. (2021). Avances en el conocimiento de la relación entre la movilidad activa a la escuela y el entorno urbano. *Revista de Urbanismo*, (45), 182-198. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2021.58168>

INEC. (2022). *Estadísticas Vitales. Registro Estadístico de Defunciones Generales de 2021*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Poblacion_y_Demografia/Defunciones_Generales_2021/Principales_resultados_EDG_2021_v2.pdf

INEN. (2016). *Accesibilidad de las personas con discapacidad y movilidad reducida al medio físico. vías de circulación peatonal* (NTE INEN 2243). <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/NTE-INEN-2243-VIAS-DE-CIRCULACION-PEATONAL.pdf>

Ministerio de Educación. (s.f.). *Ministerio de Educación*. Base de datos. <https://educacion.gob.ec/base-de-datos/>

Naciones Unidas. (2018). *The Sustainable Development Goals Report*. <https://doi.org/10.18356/7d014b41-en>

ONU-Habitat. (2021). *ONU-Habitat - Urbanismo táctico: elemento clave en la recuperación post-pandemia*.

ONU-Habitat. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/urbanismo-tactico-elemento-clave-en-la-recuperacion-post-pandemia#:~:text=El%20urbanismo%20t%C3%A1ctico%20es%20un,de%20mejora%20de%20los%20espacios>.

Orellana, D., Bustos, M.E., Marín-Palacios, M., Cabrera-Jara, N., y Hermida, M.A. (2020). Walk'n'roll: Mapping street-level accessibility for different mobility conditions in Cuenca, Ecuador. *Journal of Transport & Health*, 16, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100821>

Orellana, D., Quezada, A., Andino, A. M., Peralta, C. y García, J. (2021). eMAPS.ec: *Herramienta para Evaluación a Microescala de Ambientes Peatonales (Adaptación a ciudades ecuatorianas)* (Version 1). Universidad de Cuenca. <https://emaps.readthedocs.io/es/latest/>

La movilidad en la periferia y su dependencia con la ciudad de Cuenca

Enrique Flores-Juca  0000-0002-4539-2955

Jessica Chica  0000-0001-9576-5919

Estefanía Mora-Arias  0000-0001-5454-8715

Grupo de investigación CITMOV, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
Universidad de Cuenca, Ecuador

Puntos clave

- Cuenca presenta un modelo de desarrollo monocéntrico que genera una interdependencia con la periferia y sus patrones de movilidad.
- La planificación integral del transporte público es vital para el acceso equitativo al desarrollo y bienestar de la población.

Introducción

Cuenca, la ciudad intermedia más poblada del sistema de ciudades del Ecuador, está inmersa en un proceso de expansión urbana que carece de una planificación integral, lo que conduce a la dispersión poblacional y las desigualdades espaciales (Flores-Juca, Chica, et al., 2023). Es así que, para comprender la dinámica de la ciudad, es crucial reconocer que no es solo un área jurisdiccional, sino también un espacio de interdependencia que ejerce presión sobre su periferia, lugar donde se asienta la nueva población trabajadora de la ciudad (Flores-Juca et al., 2017a). Las parroquias periféricas son dependientes del área urbana, ya que en ella se concentra las zonas de empleo, bienes y servicios. Como resultado, se crea un nexo indisoluble entre estos

espacios geográficos (Flores-Juca, Chica, et al., 2023). En este contexto, la movilidad urbano-periférica se ha convertido en un factor relevante en la organización y el desarrollo territorial. No obstante, este tema ha sido poco abordado en la planificación, la misma que se ha centrado principalmente en el área delimitada como urbana (Flores-Juca et al., 2017b; Flores-Juca, Chica, et al., 2023).

Es necesario llevar a cabo investigaciones y difundir información acerca de los desafíos y soluciones que giran en torno a la movilidad periférica. En este marco, el objetivo de este capítulo es proporcionar una visión general de la movilidad en las periferias de Cuenca. Para ello, se abordan tres temáticas principales: i) la movilidad en la periferia, que permite contextualizar los patrones de desplazamiento de la población; ii) la importancia del transporte público en la periferia, que muestra que los territorios con mejor accesibilidad tienen mejores condiciones de vida, mientras que la baja cobertura del servicio ocasiona segregación espacial; iii) reflexiones generales, en donde se expone cómo estas investigaciones son un aporte para generar políticas públicas.

La movilidad en la periferia

La movilidad en la periferia desempeña un rol fundamental en la conectividad, accesibilidad y desarrollo de sus habitantes; sin embargo, presenta desafíos únicos producto de las distancias geográficas y las bajas densidades. Por ello es importante estudiar la movilidad desde una perspectiva integral, adaptada a las necesidades y características específicas de las áreas periféricas (Flores-Juca, Chica, et al., 2023). No obstante, la falta de información en este ámbito dificulta abordar adecuadamente su planificación y gestión. En Cuenca los estudios realizados sobre movilidad se centran principalmente en el área urbana, dejando un vacío de conocimiento sobre la movilidad en las parroquias rurales. Para llenar esta brecha del conocimiento, en Flores et al. (2017b) propusimos un conjunto de 29 indicadores que permi-

tieron medir la sostenibilidad de la movilidad en las zonas periféricas. Para esto construimos una importante base de datos con información primaria y secundaria la cual ofrece una visión general del estado de la movilidad para los asentamientos más importantes de 5 parroquias rurales: Baños, El Valle, Ricaurte, Sinincay y Tarqui. Los resultados mostraron que la movilidad en la periferia es poco sostenible, si bien un gran porcentaje de la población utiliza el autobús o camina, lo realizan en condiciones deficientes, con transporte público de mala calidad, sin espacio adecuado en la vía para caminar ni para utilizar medios alterna-

Tabla 1. Indicadores de movilidad más relevantes

Nº	Indicadores	Unidad	Parroquias rurales promedio
1	Viajes en medios no motorizados	%	13
2	Uso de transporte público colectivo	%	60
3	Viajes con transbordos hacia el área urbana	%	20
4	Tiempo medio de viajes cotidianos hacia el área urbana del cantón en transporte público	minutos	52
5	Usuarios de transporte público que pagan más de una tarifa por motivo de trabajo	%	37
6	Percepción de la calidad del transporte público colectivo recibido: Buen servicio	%	38
7	Vías de acceso adecuadas	%	47
8	Espacio viario para peatones: aceras existentes	%	27

Fuente y elaboración: Flores et al. (2017b).

tivos no motorizados (Tabla 1). Estos importantes desequilibrios promueven el uso del vehículo privado, cuyo incremento desmedido nos impedirá avanzar hacia una movilidad sostenible (Flores-Juca et al., 2017b).

Las zonas periféricas, por su dinámica y organización territorial presentan necesidades complejas de movilidad que conciben dos tipos de desplazamiento: los cortos o internos que se producen en proximidades cercanas, y los viajes largos o externos que son producto de la expansión, con desplazamientos fuera de la parroquia. La mayoría de la población (76 %) realiza viajes externos, principalmente hacia la ciudad de Cuenca, lo que demuestra su alta dependencia (Figura 1). No obstante, las parroquias periféricas que presentan mayor tasa de crecimiento poblacional tienen menor dependencia, posiblemente porque al consolidarse van adquiriendo mayores características urbanas y con ello la diversificación de usos de suelo (Flores-Juca, García-Navarro, et al., 2023).

El trabajo y el estudio son los principales motivos de desplazamiento que, por lo general tienen como destino la ciudad de Cuenca. Es importante considerar que si bien la mayoría de estudiantes (58 %) realizan viajes largos, a través de un estudio específico sobre movilidad estudiantil, encontramos que existe un importante porcentaje de estudiantes de nivel básico e intermedio, que realizan viajes cortos, generalmente a centros de educación pública (Flores-Juca et al., 2022). Por otra parte, el medio de movilización más utilizado es el autobús (60 %), seguido del vehículo privado (20 %). Estos porcentajes muestran que, si bien en las zonas periféricas se asienta población de diversos estratos socioeconómicos, mayoritariamente se compone de personas con ingresos medios bajos y bajos (Flores-Juca, García-Navarro, et al., 2023).

En cuanto al tiempo de viaje, la mayor parte (85 %) debe invertir más de 30 minutos para llegar a su destino, situación que podría agravarse en los próximos años debido a que las viviendas se están emplazando cada vez más alejadas de la ciudad, lo que implica mayor uso de vehículos motorizados, y por ende incremento del tráfico vehicular y la congestión. Mientras que, en lo referente a costos por viaje, estos son similares al del

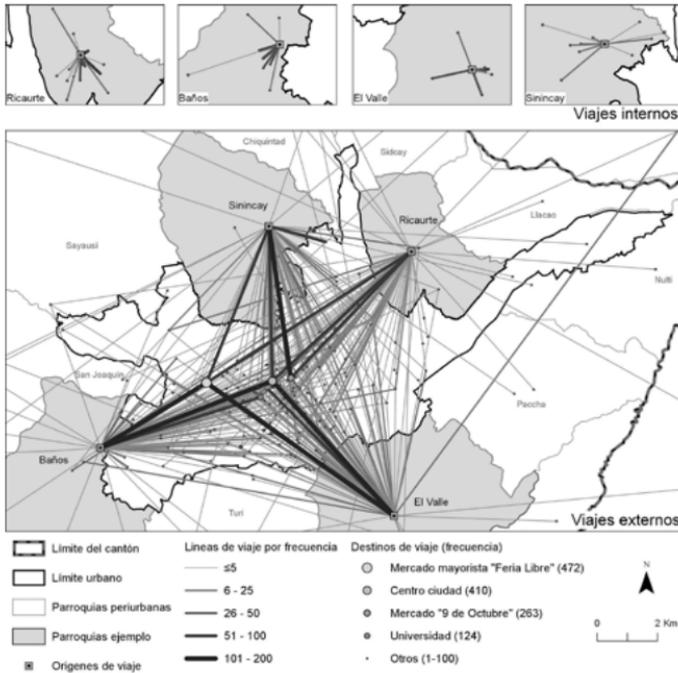


Figura 1. Desplazamientos desde las parroquias de origen hacia los principales destinos: viajes internos y externos. Fuente y elaboración: Flores-Juca, Chica, et al. (2023).

área urbana, pues la mayoría utiliza el autobús urbano que tiene su origen o destino en las parroquias rurales, no obstante, el 20 % de la población debe pagar más de una tarifa para llegar a su destino. El análisis de datos también permitió determinar que la distancia de las parroquias con la ciudad cumple un rol fundamental en la movilidad, las zonas que se encuentran más cercanas, son las que tienen mayor frecuencia de viaje semanal, además la dependencia del transporte público es menor y la dependencia del vehículo privado se incrementa. Prospectivamente se prevé que las parroquias periféricas pueden deli-

nearse por dos rumbos, por una parte, convertirse en ciudades dormitorio que acogen a la población trabajadora de la ciudad o a su vez consolidarse y convertirse en nuevas centralidades. Cualquier opción incidirá en la movilidad de la población urbana–periférica (Flores-Juca, García-Navarro, et al., 2023).

Los patrones de movilidad en las parroquias periféricas presentan complejidades y desafíos, principalmente debido a su dinámica territorial y dependencia con la ciudad. Por ello la necesidad de diseñar políticas y estrategias de movilidad sostenible que reconozcan el papel fundamental que cumple el transporte público como medio articulador de estas áreas (Flores-Juca et al., 2017a).

La importancia del transporte público en la periferia

El transporte público desempeña un papel primordial en la configuración y desarrollo de los asentamientos humanos periféricos. Su función es esencial para conectar estos espacios geográficos con la ciudad y así facilitar el acceso a las diversas actividades, especialmente para aquellos que no disponen de medios de transporte propios. No obstante, el transporte público en las zonas periféricas se caracteriza por su deficiente servicio: bajas coberturas, limitadas frecuencias y mala calidad. Estas disparidades en el acceso al transporte contribuyen a profundizar las desigualdades y la segregación espacial como lo hemos demostrado en Flores-Juca, Chica, et al. (2023).

En la periferia de Cuenca existen dos sistemas de transporte público. El primero lo conforman los *autobuses urbanos* o convencionales que conectan la zona urbana con las cabeceras parroquiales cercanas manejan una única tarifa y su frecuencia de viaje varía de 4 a 20 minutos. Este sistema presenta la particularidad que en ciertas horas alarga su recorrido a asentamientos más alejados (ruta microregional). El segundo sistema está constituido por los *autobuses interparroquiales* que conectan puntos centrales de la ciudad con las parroquias más alejadas;

este sistema está aislado, tiene su propia tarifa, la cual se difiere en función de la distancia de viaje, cuenta con unidades en mal estado y limitadas frecuencias de viaje (Flores-Juca, Chica, et al., 2023). Esta falta de integración en el servicio de autobuses genera la sobreposición de rutas urbanas e interparroquiales, que incide en la movilidad urbana, además de desigualdades en la calidad de servicio recibido para la población que utiliza uno u otro sistema.

Las trece parroquias rurales que colindan con la ciudad presentan particularidades diferentes, en la cual el transporte público constituye una condicionante clave de la dinámica urbano-territorial. En un estudio reciente de Flores-Juca, Chica, et al. (2023) definimos tres tipologías diferentes de estas parroquias (Figura 2). La tipología 1 (Ricaurte, Baños, Sinincay y San Joaquín) presentan mayor crecimiento poblacional (promedio 3,4 %), se localizan a menor distancia del centro de la ciudad (6,2 km) y son las que tienen alta accesibilidad al transporte público (86 %). La tipología 2 (Turi, El Valle, Paccha, Sinincay y Sidcay) presenta menor tasa de crecimiento (promedio 2,5 %), están más distantes del centro urbano (7,8 km) y cuentan con menor cobertura de servicio de transporte público (59 %). Finalmente, la tipología 3 (Chiquintad, Checa, Llacao y Nulti) tienen una tasa de crecimiento poblacional baja (menor a 2 %), se encuentran más distantes de la ciudad (10,3 km) y son las que presentan menor accesibilidad al transporte público. Encontramos que las parroquias con mayor acceso al servicio de autobuses son las que presentan mayor crecimiento poblacional y son las más próximas al centro urbano, evidenciando de esta manera la importancia del transporte público en el desarrollo.

Una característica de un sistema de transporte público eficiente y que garantice la movilidad sostenible, es permitir el uso integrado de los modos de transporte que faciliten la intermodalidad, puesto que, el efecto de la distancia puede neutralizarse si se cuenta con conectividad físico-espacial. Para las vías que conectan las parroquias periféricas con el área urbana de Cuenca, encontramos que tan solo el 28 % de estaciones de bus cuentan con infraestructura que preste de cierta manera condiciones de seguridad y confort, sin embargo, la mayoría

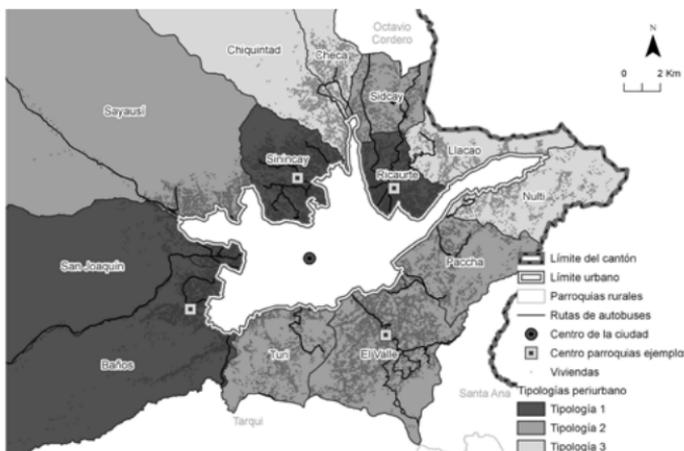


Figura 2. Tipología de las parroquias periféricas en función del crecimiento poblacional, acceso al servicio de transporte público y distancia con el centro de la ciudad. Fuente y elaboración: Flores-Juca, Chica, et al. (2023)

de estas no se encuentran en buen estado o no responden a normas de localización o dimensionamiento. Lo que evidencia la falta de planificación integral del transporte (Flores-Juca et al., 2020).

En la investigación publicada en Flores-Juca, García-Navarro, et al. (2023) encontramos que el acceso al transporte público y la densidad poblacional son variables importantes para definir la segregación espacial laboral existente en la periferia. Los resultados muestran que la red de transporte público abastece eficientemente a las zonas más densas, mientras que las zonas menos densas tienen menor cobertura del servicio, se localizan en promedio a 650 metros de esta red, inclusive existen viviendas emplazadas a más de un kilómetro de distancia. El 35 % del total de viviendas no tienen cobertura del servicio de autobuses, por lo tanto, sus habitantes en caso de no disponer de medios propios deben realizar mayores esfuerzos para desplazarse: mayor tiempo de caminata, o inclusive tomar otros medios de transporte (transbordos), enfrentándose así a

una segregación espacial que condiciona su desarrollo. Por otra parte, el tiempo promedio de movilización de la periferia a su lugar de trabajo oscila entre los 38 y 43 minutos, sin embargo, el 35 % de población que reside en zonas de baja densidad deben utilizar más de 45 minutos para llegar a sus trabajos. En gasto por transportación, la mayoría de las personas deben pagar una tarifa urbana, no obstante, el 34 %, emplazada principalmente en las zonas menos densas, paga más de una tarifa urbana para llegar a sus empleos.

En general, no es de extrañar que el acceso a los autobuses sea mucho más limitado en las zonas menos densas, debido a que en estas áreas el servicio estaría infrutilizado y por lo tanto no sería rentable. Esta situación se complejiza aún más cuando el servicio está en manos de empresas privadas, las cuales evidentemente buscan su beneficio económico (Flores-Juca, García-Navarro, et al., 2023).

Estas tendencias existentes ponen de manifiesto que Cuenca se encuentra en un proceso de metropolización que se está llevando a cabo en condiciones de desigualdad, sin planificación integral y con deficiente gestión y control de la ocupación del suelo, situación que seguirá agravándose a medida que continúe el crecimiento poblacional y se asienten en lugares cada vez más dispersos.

Reflexiones generales

Garantizar la accesibilidad es primordial para el desarrollo de la población, por lo que es fundamental tener en cuenta los resultados de investigaciones que permitan identificar las principales áreas críticas en la movilidad de las zonas periféricas. Cada uno de los estudios realizados sobre esta temática han representado un avance significativo en la comprensión de la movilidad en la periferia de Cuenca. Con base en los resultados obtenidos, es posible conocer de manera más precisa y detallada que la falta de accesibilidad espacial del transporte afecta en mayor medida a la población de bajos recursos, quienes presentan dificultades

para costear el servicio de transporte. Además, deben recorrer largas distancias diarias para llegar a sus destinos y con ello las repercusiones sociales y económicas que representan.

En este marco, las investigaciones constituyen el punto de partida para que el gobierno local y otros actores involucrados en la planificación y gestión de la movilidad pueden identificar las principales áreas críticas que enfrenta la población periférica. A partir de ello, se pueden diseñar políticas y proyectos orientados a una movilidad más sostenible, equitativa y eficiente que integre el servicio de transporte público cantonal, urbano e interparroquial, de manera funcional, física y tarifariamente y que promueva el uso de medios alternativos comunitarios para el adecuado desplazamiento de la población más dispersa. Es importante además que se priorice el uso de medios de transporte sostenibles, con una visión social, ambiental y económica que contribuya a mejorar la calidad de vida de la población, especialmente de aquella que históricamente ha sido segregada.

Referencias

Flores-Juca, E., Chica, J., Mora-Arias, E., y García-Navarro, J. (2023). Reinterpretando el papel de la movilidad en las zonas periurbanas: un análisis multiescala en Cuenca–Ecuador. *Revista Geografía de Norte Grande*, 84, 1–21. <https://ojs.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/23029>

Flores-Juca, E., García-Navarro, J., Chica, J., y Mora-Arias, E. (2017a). El transporte público como medio para el desarrollo. *ASRI Revista Investigativa Arte y Sociedad*, 13, 1–15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6173006>

Flores-Juca, E., García-Navarro, J., Chica, J., y Mora-Arias, E. (2017b). Identificación y análisis de indicadores de sostenibilidad para la movilidad. *Estoa*, 6(11), 99–109. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/view/1437>

Flores-Juca, E., García-Navarro, J., Mora-Arias, E., y Chica, J. (2023). La segregación espacial desde la perspectiva de la movilidad cotidiana y la densidad de las zonas periurbanas de Cuenca en Ecuador. *Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales*, 49(147), 1–22. <https://doi.org/10.7764/EURE.49.147.04>

Flores-Juca, E., Mora-Arias, E., & Chica, J. (2020). Una mirada a la planificación de las infraestructuras nodales de transporte terrestre en las cercanías al centro urbano de Cuenca Ecuador. *Quid 16*, 14, 269–282. <https://publicaciones.sociales.uba.ar/index.php/quid16/article/view/4537>

Flores-Juca, E., Mora-Arias, E., Chica, J., & Balseca, M. (2022). Evaluación de la movilidad de estudiantes y accesibilidad espacial a centros de educación en zonas periurbanas. *Novasinerгия*, 5(1), 128–149. <https://doi.org/10.37135/NS.01.09.08>



La accesibilidad frente a distintas condiciones de movilidad

María Elisa Bustos^{1,2}  0009-0002-3271-3761

Daniel Orellana^{1,2}  0000-0001-8945-2035

Mateo Marín^{1,2}

Natasha Cabrera^{1,2}  0000-0002-1469-2349

Augusta Hermida^{1,2}  0000-0003-1326-2723

¹ LlactaLAB-Ciudades Sustentables, Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población. Universidad de Cuenca, Ecuador.
² Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca, Ecuador

Puntos clave

- La normativa nacional de accesibilidad al medio físico es poco aplicada en las calles de la ciudad.
- Las calles y aceras de Cuenca son altamente inaccesibles para personas con diferentes perfiles de movilidad.
- El espacio público de la ciudad es un entorno discapacitante.
- Se debe revisar y mejorar la normativa nacional de accesibilidad.
- La ciudad debe generar políticas para entornos urbanos inclusivos.

Accesibilidad y discapacidad

Se estima que en Latinoamérica y El Caribe viven alrededor de 66 millones de personas con algún tipo de discapacidad. En el 2017 las Naciones Unidas establecieron que las ciudades deben

ser diseñadas para todos, y dar a las personas la oportunidad de moverse libremente, ya sea a pie, en bicicleta o en una silla de ruedas (United Nations, 2017). Así, el modelo de ciudad inclusiva ha surgido como una propuesta de desarrollo urbano en la que todas y todos deben tener acceso y movilidad autónoma para trasladarse a donde y cuando deseen (Zajac, 2016).

En Ecuador, el INEN ha emitido la Norma Técnica Ecuatoriana para Accesibilidad al Medio Físico (2016) que, mediante una guía, pretende garantizar que las nuevas intervenciones en espacios urbanos cuenten con accesibilidad universal. Pese a esto, pocas veces se toman en cuenta las regulaciones. Además, debido a la falta de estudios y evaluaciones de su efectividad, es incierto si estas regulaciones están reduciendo la desigualdad en la accesibilidad a los espacios urbanos.

Ciertamente, Cuenca ha descuidado la inclusión de personas con discapacidad en la planificación y construcción del espacio público. De hecho, en las últimas décadas, las intervenciones se han enfocado en promover el uso del automóvil, se ha mejorado la infraestructura de calzadas e incrementado zonas de parqueo de bajo costo (Municipalidad de Cuenca, 2015) mientras que la infraestructura designada para peatones y personas con diferentes perfiles de movilidad ha quedado relegada a los espacios residuales, mal mantenidos y en muchos casos es inexistente.

Como consecuencia, las personas con discapacidad sufren restricciones, ven limitado su acceso a las oportunidades urbanas y a la vida pública y quedan confinadas a unos pocos espacios en los que pueden movilizarse. Esto constituye una discriminación a partir de la falsa premisa de que las condiciones de movilidad "normales" tienen mayor valor que las condiciones de movilidad diferentes (Abberley, 2008). Se debe revisar el concepto de personas con discapacidad para poner atención en los entornos discapacitantes (Allué, 2003) que generan exclusión y discriminación en su interacción con las diversidades funcionales.

En este contexto, este capítulo presenta brevemente algunas investigaciones relacionadas con la accesibilidad a nivel de calle para diferentes condiciones individuales de movilidad.

La accesibilidad en Cuenca

La accesibilidad a nivel de calle cuenta con diversos aspectos, los dos más importantes son la *conectividad*, es decir la posibilidad o no de acceder a un espacio, y la *permeabilidad*, referida a la facilidad para desplazarse por ese lugar. La conectividad es en último término una propiedad binaria, mientras que la permeabilidad puede ser representada en un rango de valores.

En la investigación realizada en Orellana et al. (2020) evaluamos el nivel de accesibilidad física en las aceras de Cuenca, considerando dos aspectos clave: el cumplimiento de la normativa y las condiciones reales de accesibilidad. El primero analizó el nivel de cumplimiento de la normativa INEN de accesibilidad, considerando el cumplimiento de estándares generales, la conectividad y la permeabilidad; mientras que el segundo caracterizó la presencia de obstáculos que dificultan el desplazamiento para tres perfiles funcionales de movilidad.

Para el estudio fueron auditadas las aceras de 214 segmentos de calle, aleatoriamente distribuidos en la zona urbana. Se realizaron dos tipos de levantamientos, el primero consistió en un *checklist* para evaluar el cumplimiento de la normativa INEN, donde se verificaron 17 parámetros relacionados a la accesibilidad en aceras (Tabla 1). El segundo fue un mapeo de presencia de obstáculos y de la dificultad para moverse, efectuado con personas pertenecientes a tres perfiles de movilidad: sin restricciones de movilidad, con movilidad reducida (empujando un coche de bebé) y con impedimento físico (usuarios de silla de ruedas). Adicionalmente, con la información levantada en el mapeo se calculó un índice de accesibilidad para cada tramo de forma que se pueda evaluar la conectividad y permeabilidad.

Tabla 1. Parámetros evaluados de la normativa INEN

Parámetros INEN
Señalización
Ancho mínimo libre de obstáculos
Alto mínimo libre de obstáculos
Cambio de textura para anunciar obstáculos
Pendiente transversal
Altura de aceras
Áreas de descanso
Pavimento firme
Pavimento antideslizante
Rejillas
Pozos de revisión
Rampas en cruces peatonales
Rampas libres de obstáculos
Ancho de cruces peatonales
Áreas de descanso en cruces peatonales
Paradas de bus
Banda de equipamiento

Cumplimiento de la normativa

La evaluación del cumplimiento de la normativa reflejó que ninguna de las rutas evaluadas llegó al 100 % de los parámetros considerados. Menos del 10 % de tramos tienen un cumplimiento sobre 70 % y tres cuartos de los tramos tienen menos del 50 % de cumplimiento (Figura 1). Las zonas cercanas al centro de la ciudad presentaron mayores porcentajes de cumplimiento, sin embargo, fueron disminuyendo hacia la periferia. Los resultados demuestran que la ciudad está lejos de cumplir los estándares planteados en la normativa ecuatoriana.

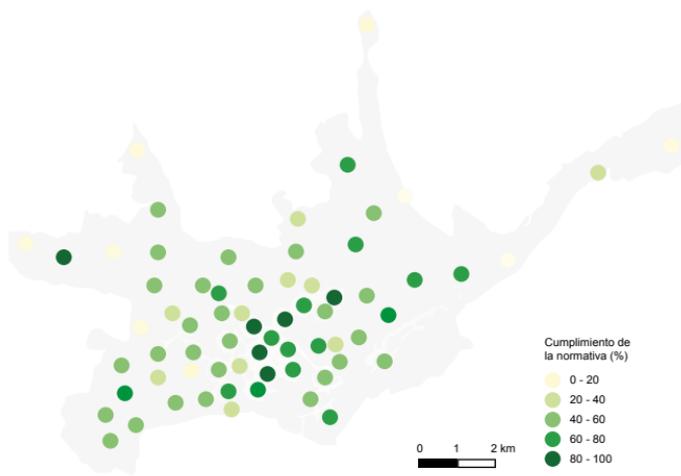


Figura 1. Porcentaje de cumplimiento de la normativa INEN.

Frecuencia e impacto de obstáculos

Las tapas de pozos constituyen el obstáculo más frecuente, mientras que, paradójicamente, a las rampas de acceso para sillas de ruedas les corresponde el segundo lugar, seguidas por las rampas de entrada a los domicilios (Figura 2). Es lamentable que las rampas, un dispositivo supuestamente diseñado para la accesibilidad, sean los obstáculos que más impacto causan en la accesibilidad, principalmente para usuarios de sillas de ruedas. Es claro que la normativa se aplica sin criterio, pues la mayoría de las rampas de acceso tienen pendientes y anchos inadecuados. Por otro lado, las rampas de ingreso de vehículos disminuyen el ancho efectivo de la acera, constituyendo, en muchos casos, obstáculos insalvables. Las rampas, en conjunto, dan cuenta de dos tercios del impacto negativo de la accesibilidad en la ciudad.

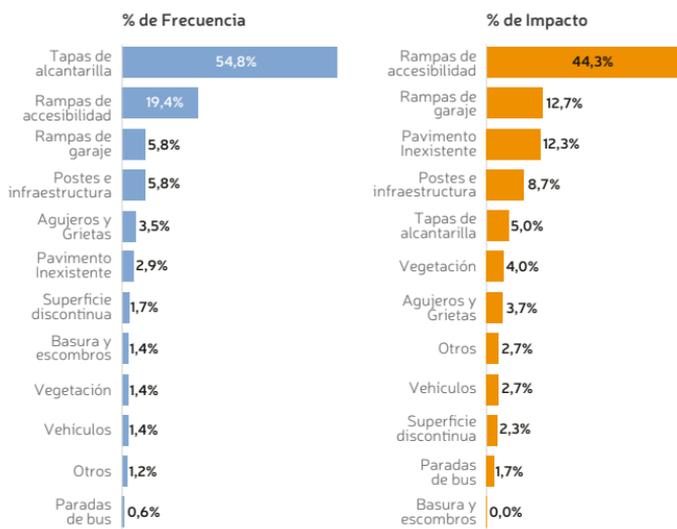


Figura 2. Frecuencia e impacto de los obstáculos levantados por usuarios de silla de ruedas.

Índices de accesibilidad a nivel de calle

Los valores del índice de accesibilidad calculados a partir del mapeo de obstáculos presentaron diferencias significativas para los tres perfiles de movilidad, tanto para la conectividad como para la permeabilidad.

En cuanto a la conectividad, la mitad de los tramos fueron completamente inaccesibles para los usuarios de silla de ruedas, mientras que aquellos con movilidad reducida encontraron inaccesibles 3 de cada 10. En el caso de las personas sin restricción de movilidad, únicamente el 15 % de tramos fueron inaccesibles.

La situación de la permeabilidad se representa en la Figura 3 donde se evidencia que la mayoría de los tramos son inaccesibles o muy inaccesibles para todos los perfiles de mo-

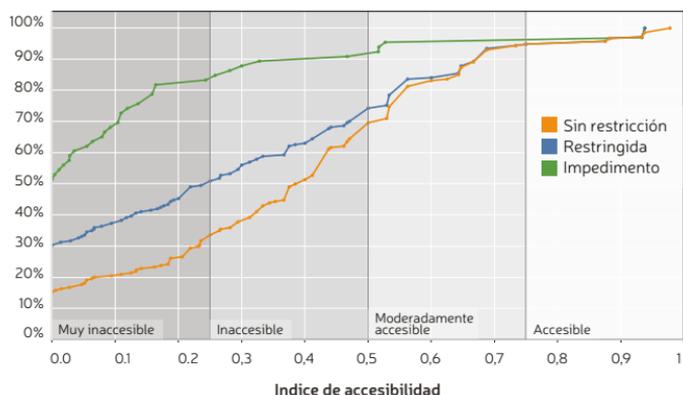


Figura 3. Índices de accesibilidad para tres perfiles de movilidad.

vilidad. Pero es más preocupante observar las enormes dificultades que tienen las personas con impedimento físico para acceder al espacio público, pues para ellas, más del 90 % de los tramos presentan serias dificultades de accesibilidad.

Las calles y aceras de Cuenca son altamente inaccesibles. Incluso las aceras con alto nivel de cumplimiento de la norma INEN, fueron evaluadas con bajos índices de accesibilidad por los usuarios de silla de ruedas, lo que sugiere que la regulación nacional no está logrando su cometido.

Conclusiones

Tres hallazgos clave evidencian que las aceras de la Cuenca constituyen un entorno discapacitante: 1) las aceras tienen un diseño deficiente, inapropiado y con presencia prevalente de obstáculos; 2) la normativa nacional de accesibilidad al medio físico se incumple de forma generalizada, y 3) existe una profunda desigualdad de accesibilidad para diferentes condiciones de movilidad.

La ciudad debe mejorar sus niveles de accesibilidad al espacio público para todas las personas. Para esto es imprescindible abordar el problema desde varios frentes. Por un lado, es necesario que las instituciones reguladoras revisen y ajusten la normativa con base en evidencia y con la participación de personas con distintas condiciones de movilidad. Por otro lado, es indispensable lograr una apuesta por una política pública de accesibilidad reconociendo el derecho a la ciudad, de todas las personas. Para esto es obligatorio que tanto los actores políticos locales como la ciudadanía organizada se involucren. Finalmente, se requiere que las diversas instituciones y dependencias que tienen competencia o que intervienen físicamente en el espacio público (Planificación Urbana, Movilidad, Obras Públicas, Empresa Eléctrica, ETAPA EMOV) realicen una apuesta común para mejorar y mantener el espacio público accesible.

Una de las principales contribuciones de esta investigación es la valoración paralela que se realizó tanto para personas sin restricciones de movilidad, personas con movilidad reducida parcialmente y personas en silla de ruedas, lo que permitió tener una evaluación objetiva de la diferencia de accesibilidad en las áreas de estudio. Por otra parte, se diseñó e implementó una aplicación móvil de libre uso para la evaluación de accesibilidad de las vías, al ser gratuita permite tener un sistema de pruebas y comparación de estudios.

Es importante mencionar que el estudio se enfocó en las discapacidades relacionadas con la movilidad física por tema de recursos y tiempo, dejando de lado un amplio rango de discapacidades. Para futuros trabajos resulta fundamental integrar distintos tipos de discapacidad que podrían darle un nuevo enfoque a la accesibilidad y ser una guía para la planificación de la ciudad.

Tener algún tipo de impedimento físico, visual o psicosocial no debe significar ser discapacitado. Dentro de toda la complejidad humana existen personas con diversas funcionalidades y el entorno construido debe contribuir e incentivar la independencia de todas las personas y usuarios del espacio público. La planificación e intervención de los espacios públicos, incluidas las calles y aceras, deben ser apropiadas para distin-

tos grupos de usuarios adaptándose a sus habilidades y preferencias. La discapacidad no afecta solo al individuo sino a toda su familia, tener una accesibilidad adecuada en las ciudades se vuelve un factor primordial para mejorar la calidad de vida de todas y todos, sin dejar a nadie atrás.

Referencias

Abberley, P. (2008). El concepto de opresión y el desarrollo de una teoría social de la discapacidad. En L. Barton (Ed.), *Superar las barreras de la discapacidad: 18 años de "Disability and society"* (pp. 34–50). Morata.

Allué, M. (2003). *Discapitados: la reivindicación de la igualdad en la diferencia*. Edicions Bellaterra.

INEN. (2016). NTE INEN 2243: *Accesibilidad de las personas con discapacidad y movilidad reducida al medio físico. Vías de circulación peatonal. Segunda Revisión (No 2243)*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/NTE-INEN-2243-VIAS-DE-CIRCULACION-PEATONAL.pdf>

Municipalidad de Cuenca. (2015). Plan de movilidad y espacios públicos. *Tomo I*, 540.

Orellana, D., Bustos, M. E., Marín-Palacios, M., Cabrera-Jara, N., & Hermida, M. A. (2020). Walk'n'roll: Mapping street-level accessibility for different mobility conditions in Cuenca, Ecuador. *Journal of Transport and Health*, 16, 100821.

United Nations. (2017). *New Urban Agenda*.

Zajac, A. P. (2016). City Accessible for Everyone – Improving Accessibility of Public Transport Using the Universal Design Concept. *Transportation Research Procedia*, 14, 1270–1276.



Transporte público en Cuenca: línea base y oportunidades de mejora

Patricia Cazorla  0000-0002-6730-3773

Elina Ávila-Ordóñez  0000-0003-1135-3154

Departamento de Ciencias de la Computación, Grupo de Investigación
Modelos, Análisis y Simulaciones, Universidad de Cuenca

Puntos clave

- Es necesario mejorar la planificación urbana y la eficiencia del transporte público para hacer la ciudad inclusiva, segura, resiliente y sostenible.
- Se presentan metodologías holísticas y de optimización para mejorar calidad del servicio.
- Se definen los desafíos que los gobiernos autónomos descentralizados deberán asumir.

49

Introducción

El transporte público (TP) en Cuenca es un tema crítico para su desarrollo sostenible. No solo es vital para garantizar la accesibilidad de las personas a las actividades cotidianas, sino que también contribuye a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y mitigar los efectos negativos de la motorización individual en la salud, la economía, la configuración de la ciudad y las relaciones sociales (UN General Assembly, 2015). El servicio de buses es el modo de transporte público más difundido en la ciudad, por lo tanto es importante garantizar un servicio accesible, justo y sostenible.

Sin embargo, los resultados de investigación indican que existen oportunidades de mejora en la configuración y gestión

del transporte público en Cuenca (Avila-Ordóñez et al., 2022; Cazorla, 2021); por ejemplo, un porcentaje significativo de la población no tiene acceso este servicio (Municipalidad de Cuenca, 2015), lo que podría reducirse con una mejor distribución espacial y ruteo de las líneas.

A nivel mundial, los servicios públicos suelen ser los más afectados durante situaciones de emergencia, como la pandemia del COVID-19 (Calderón, et al., 2022). Ese fue el caso de Ecuador, el transporte público fue uno de los sectores económicos más afectados, lo que generó un largo proceso de recuperación una vez levantadas las restricciones de movilidad (Villa et al., 2021).

La implementación de medidas como el desarrollo orientado al transporte (DOT) y la gestión de la demanda del transporte (GDT) podrían lograr un equilibrio entre la accesibilidad y la habitabilidad en la ciudad, reducir la dependencia del automóvil y priorizar modos sostenibles de transporte (Cazorla, 2021).

DOT es un enfoque de planificación urbana que integra el diseño de espacios con el sistema de transporte para promover una movilidad sostenible y eficiente. Busca crear entornos urbanos compactos, conectados y menos dependientes del automóvil, fomentando el uso de modos de transporte activos y públicos (Wiedmann y Schlosser, 2021). Su objetivo es mejorar la calidad de vida y reducir el impacto ambiental en la movilidad urbana. Por otro lado, la Gestión de la Demanda de Transporte (GDT) consiste en estrategias para influir en la demanda de viajes y mejorar la eficiencia y sostenibilidad del transporte. Promueve alternativas como el uso compartido de vehículos, el transporte público y la movilidad activa. Incluye la planificación del uso del suelo y políticas tarifarias para optimizar la infraestructura y reducir la congestión y los impactos ambientales, para mejorar la accesibilidad y la calidad de vida de los usuarios (Wang et al., 2022).

Por otro lado, la formulación del problema de configuración de líneas junto con la aplicación de algoritmos para la optimización del problema permitiría alcanzar una configuración de la red con una significativa disminución en el tiempo total de viaje (Avila-Ordóñez y Vansteenwegen, 2015). Además, la configuración flexible de las líneas de buses permitiría realizar ajustes a los recorridos en situaciones inusuales, lo que repre-

senta una ventaja en términos de adaptabilidad y eficiencia en el servicio de transporte público (Ávila-Ordóñez et al., 2022).

El transporte público es un sistema complejo que implica múltiples perspectivas técnicas, económicas, sociales y urbanas, entre otras. Por lo tanto, es fundamental identificar a todas las partes interesadas para formar alianzas que fortalezcan el proyecto y faciliten su ejecución, o para tomar medidas oportunas que debiliten posibles oposiciones (Dudley et al., 2019; Sarker et al., 2020). La aplicación de metodologías holísticas como la Teoría de Red de Actores (ANT, por sus siglas en inglés) para mejorar el servicio de transporte público es una contribución novedosa en la región en términos de conocimiento académico y metodologías aplicadas (Muniesa, 2015).

ANT permite mapear y analizar la complejidad física y social de infra-sistemas. Un infra-sistema se refiere a la infraestructura física y material que permite las interacciones sociales y facilita la formación de redes entre los actores. Estos pueden ser objetos y tecnologías como carreteras, edificios, redes de comunicación y sistemas de transporte. ANT posibilita la comprensión sobre cómo las infraestructuras y las tecnologías moldean el comportamiento y las interacciones sociales de los actores involucrados (Sarker et al., 2020).

En este capítulo se establece la línea base del transporte público de Cuenca, se analiza su relación con la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, y se examina la deficiencia de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales en asumir las competencias transferidas por el gobierno central. Además, se presenta el plan de líneas de buses en Cuenca y se destacan las ventajas de contar con una configuración flexible en dicho plan.

Línea base del transporte público

El transporte público en Cuenca se compone de autobuses y tranvía, pero la cobertura de buses solo llega al 77,5 % del territorio urbano (Municipalidad de Cuenca, 2015). El GAD Municipal

es responsable de brindar el servicio de transporte público en la ciudad, aunque el servicio de buses, taxis y transporte mixto es operado por el sector privado. La ausencia de una planificación urbana adecuada impacta negativamente al transporte público, afectando la calidad de vida de los ciudadanos y su movilidad.

Aunque el gobierno central y local proporcionan subsidios para el transporte público, estos no se enfocan en mejorar la calidad del servicio. Además, los accidentes de tráfico son una de las principales causas de muerte en Ecuador, 3 279 en 2021 según el INEC (2022). La cercanía a las estaciones, o paradas de transporte, y la cobertura geográfica son importantes para determinar la accesibilidad del transporte público en Cuenca. La percepción de la calidad del servicio es variable, y la inseguridad en el interior de las unidades es lo que más desestimula el uso de este medio de transporte (Mejía et al., 2015).

Para mejorar la productividad del transporte público en Cuenca y promover una ciudad inclusiva, segura y resiliente, es necesario aplicar medidas adicionales que lo conviertan en un servicio sostenible en términos de cobertura, accesibilidad, ocupación de vehículos, tiempo de viaje, saturación vial y emisiones de CO₂ (Cazorla, 2021). La planificación urbana es fundamental para mejorar la eficiencia, confianza, accesibilidad y rentabilidad del transporte público en una ciudad.

En el estudio de Cazorla P. (2021) hemos identificado a los actores interesados y los no interesados, las relaciones formales entre ellos y las interdependencias que juegan un papel en el establecimiento y ejecución de estrategias para mejorar el servicio y la cobertura del transporte público en Cuenca. La tabla 1 muestra los 11 actores identificados, de los cuales se reconoce a los operadores de zonas privadas de aparcamiento como los principales opositores a la mejora del servicio de transporte público en buses. Se propusieron 22 actividades de desarrollo orientadas al transporte y a la gestión de la demanda, con participación ciudadana, comunicación y coordinación entre los departamentos gubernamentales. Además, se reconoce en el estudio, la necesidad de entender el modelo de negocio de los operadores privados de transporte público para garantizar la sostenibilidad del proyecto.

Articulación con la LOTTSV y la brecha en la implementación

La Ley Orgánica de Transporte terrestre, Tránsito y Seguridad Vial (LOTTSV) del Ecuador, modificada en agosto de 2021, establece pautas para la planificación del transporte, priorizando la equidad, libre movilidad y desarrollo sostenible, en concordancia

Actividades	Acciones a tomar	Actores responsables
1. Balanceo de la demanda de TP durante el día		
1.1 Aumentar la densidad de población en áreas donde la infraestructura vial actual está subutilizada y existen terrenos vacantes	Actualización del inventario de lotes vacantes	Secretaría General de Planificación, Dirección de Gestión de la Movilidad (DGM)
1.2 Reconfiguración del plan de líneas de manera que cada zona de origen se conecte de forma eficiente hasta la principal zona de destino	Crear matriz origen-destino por zona por línea de bus	DGM, EMOV EP
1.3 Balanceo de los atractores de viaje en las zonas con alta demanda de TP	Actualización del inventario de los atractores de viaje	Secretaría General de Planificación, DGM
1.4 Incrementar la confiabilidad en el sistema de TP	Establecer una configuración flexible del plan de líneas	EMOV EP, Consorcio SIR Cuenca (Operadores del servicio de transporte público en buses)

Actividades	Acciones a tomar	Actores responsables
1.5 Cumplimiento con los puntos de parada	Programas de educación vial en escuelas y colegios, y programas de capacitación para operadores de autobuses	Consortio SIR Cuenca, usuarios de bus, Ministerio de Educación, EMOV EP
1.6 Mejora en el método de pago del ticket de TP	Fortalecer el uso de la tarjeta electrónica mediante campañas publicitarias y programas de educación vial	Consortio SIR Cuenca, usuarios de bus, Ministerio de Educación, EMOV EP
1.7 Implementar sistemas de seguridad dentro de las unidades, como cámaras de video (frontales y traseras), validadores de boletos y botones de emergencia	Supervisión, control y monitoreo aleatorio de los dispositivos instalados	Consortio SIR Cuenca, EMOV EP
1.8 Fortalecer la formación y capacitación de los conductores	Convenios con las universidades para brindar formación académica a través de programas de formación continua	Consortio SIR Cuenca, EMOV EP, Universidad de Cuenca
1.9 Brindar un servicio de calidad y calidez	Convenios con las universidades para brindar formación académica a través de programas de formación continua	Secretaría General de Planificación

Actividades	Acciones a tomar	Actores responsables
2. Ampliación de la cobertura del servicio de transporte público en buses		
2.1 Densificar áreas con escasa población mediante el estímulo a constructores para implementar programas de vivienda	Mejorar la coordinación entre el departamento de planificación y control, basándose en los productos de 1.1. Proporcionar incentivos para aumentar el número de viviendas por lote	Secretaría General de Planificación, DGM
2.2 Reconfiguración del plan de líneas	En base a los resultados del punto 1.2	DGM, EMOV EP
2.3 Reconfiguración de los puntos de parada	En base a los resultados del punto 2.2	DGM, EMOV EP
3. Reducir el costo total del viaje para el servicio de TP		
3.1 Mejorar las condiciones de la infraestructura vial por donde circulan los buses	En base a los resultados del punto 1.2	DGM, Obras úbricas (OOPP)
3.2 Implementar políticas de prioridad para el TP en los principales corredores	Utilizar los datos del centro de operación de tráfico (semáforos, señalización horizontal y vertical, elementos físicos) para gestionar el tráfico	DGM, OOPP

Actividades	Acciones a tomar	Actores responsables
3.3 Implementar una frecuencia dinámica dentro de la tabla de operaciones del TP	En base a los resultados de los puntos 2.2 y 1.3	DGM, Consorcio SIR Cuenca
3.4 Ampliar la cobertura del servicio de TP a toda el área urbana	En base a los resultados de los puntos 1.3 y 2.2	DGM, EMOV EP
4. Disminuir la dominancia del vehículo privado		
4.1 Revisar el esquema fiscal para la adquisición de vehículos y estimular el uso de medios de transporte limpios y alternativos	Reducción progresiva de los subsidios a los combustibles para los usuarios de vehículos privados. Fortalecer e incrementar los impuestos verdes, por ejemplo, la implementación de impuestos por kilómetros recorridos durante periodos pico en zonas congestionadas	GAD Municipal de Cuenca
4.2 Incremento del tiempo de viaje para los usuarios de vehículos privados en favor de los usuarios de TP (prioridad al TP en los corredores)	En base a los resultados del punto 3.2	DGM, EMOV EP

Actividades	Acciones a tomar	Actores responsables
4.3 Reducción progresiva de la oferta de aparcamiento en el distrito central e incremento de aparcamiento de borde	En base a los resultados de los puntos 1.3 y 2.2	DGM, EMOV EP, Secretaría General de Planificación, Operadores privados de zonas de aparcamiento
4.4 Cambio en la percepción de la ciudadanía respecto a la relación entre propiedad de un vehículo privado y el estatus social	Programas de educación en escuelas y colegios	EMOV EP, Organización ciudadana, Ministerios de Educación

cia con los artículos 66 y 397 de la Constitución de la República del Ecuador.

La LOTTSV garantiza la priorización del espacio vial y recursos en el siguiente orden: peatones, ciclistas, usuarios de transporte público, transporte comercial y de carga, y usuarios de transporte particular (Arts. 3, 7). También establece la obligación de expedir un Plan Nacional de Movilidad y Logística del Transporte y Seguridad Vial, supervisar y evaluar su implementación (Arts.15, 196B) y promover el uso de plataformas digitales para la gestión de terminales terrestres, peaje automático y un modelo de gestión de transporte (Arts. 62A, 64A y 65A).

La ley también estimula la movilidad activa como política nacional, establece la necesidad de implementar un Sistema de Información de Movilidad (Art. 214K) y reconoce la importancia de la capacitación de conductores y actores de la movilidad para promover una cultura vial responsable y sostenible (Arts. 88, 93). En particular, se prioriza la capacitación en movilidad activa, respeto al peatón y al ciclista en los programas de capacitación (Arts. 185, 186, 204D, 204E de la LOTTSV).

Sin embargo, muchos gobiernos autónomos descentralizados enfrentan desafíos en el cumplimiento de estos artículos debido a la falta de conocimiento y capacidad técnica en la materia. En Cuenca, la planificación y gestión del transporte público requiere un enfoque multidisciplinario y un profundo conocimiento de las mejores prácticas, modelos de movilidad y tecnologías disponibles. Sin embargo, el gobierno local carece de acceso a expertos que aprovechen la información de la matriz origen-destino que entregamos en 2020 y que permitiría abordar eficazmente los desafíos del transporte público.

Esta limitación de capacidad técnica puede llevar a la implementación de políticas y proyectos inadecuados o mal ejecutados, lo que resulta en una baja calidad de los servicios de transporte y una limitada satisfacción de los usuarios en Cuenca. Por lo tanto, es fundamental fortalecer la capacitación y el apoyo técnico para los funcionarios encargados de la planificación y gestión del transporte en el ámbito local, con el objetivo de asegurar una implementación adecuada de la legislación y una mejora significativa en la eficiencia y calidad del transporte público en la ciudad.

El plan de líneas de buses de Cuenca

El Problema de Planificación de Líneas (LPP, en inglés) es un problema combinatorio complejo que permite diseñar el conjunto de líneas que forman parte de un servicio de buses; es decir, un plan de líneas (Borndörfer et al., 2008; Schöbel, 2012; Durán-Micco & Vansteenwegen, 2022). Esta es una decisión estratégica que se ubica en la primera fase del proceso de planificación de transporte público inicialmente definido en el estudio de Ceder & Wilson (1986). Luego, se decide de forma secuencial las frecuencias, horarios de partida y horarios para la flota y conductores.

El sistema de transporte público en bus de Cuenca se ha configurado, en un principio, en respuesta a la aparición de nuevas zonas pobladas y a la ubicación de los atractores de via-

je más demandados por la población. Luego, ha sufrido ajustes a través de los años, con base en estudios técnicos que han evaluado el servicio y han propuesto modificaciones. A pesar, de que el servicio actual contribuye a la movilidad en la urbe, el diseño del plan de líneas podría mejorarse aplicando algún método formal que facilite su optimización. En el estudio de Ávila-Ordóñez et al. (2022) se aplica el LPP al servicio de buses de Cuenca vigente al 2019 y demuestra que podría obtenerse beneficios especialmente en reducir el tiempo total de viaje en un 10 %; además de una importante reducción en el número de transferencias requeridas para conectar cualquier par de puntos de la ciudad. Este ejemplo, demuestra la oportunidad de mejorar que tienen los indicadores de desempeño de este importante transporte público.

El LPP requiere de varios parámetros de entrada como la infraestructura, los tiempos de viajes, los tiempos de transferencia o la demanda. La demanda determina los lugares de origen y los destinos de los viajes y se emplea en el LPP para satisfacer a todo usuario potencial del servicio. Sin embargo, contar con este dato merece grandes esfuerzos de la ciudad por procurar recolectarlos y mantenerlos. En la actualidad la Universidad de Cuenca, a través de su grupo de investigación Modelos, Análisis y Simulaciones del Departamento de Ciencias de la Computación, se encuentra aplicando un modelo matemático estocástico para determinar la demanda de transporte público en la ciudad. Esa investigación está en curso y próximamente entregará a la ciudad una matriz de orígenes-destinos multimodal diaria, que será el insumo de muchos procesos que conduzcan a soluciones de los problemas de movilidad en la urbe.

Un toque de flexibilidad

Un usuario del servicio de bus aprende a usarlo y se acostumbra a él, pero reconoce que en ocasiones el ruteo inyecta tiempos adicionales a su viaje. Por ejemplo, no todas las líneas de bus siguen los caminos más cortos entre dos puntos. Además, en-

tendemos a una ruta de bus como algo que carece de flexibilidad, únicamente situaciones que impidan su circulación, como un cierre de vía, provocan un cambio en su ruta. En el estudio de Ávila-Ordóñez et al. (2022) proponemos una visión distinta para el ruteo de líneas de buses, un enfoque flexible al que se denomina *Flexible Line Plan* (FLP).

En Cuenca, como en muchas otras ciudades, existen eventos inusuales que pueden ser anunciados y por lo tanto darnos oportunidad de organizarnos; un ejemplo es la realización de eventos en el Estadio Municipal. Esta situación restringe el tráfico en las zonas aledañas, cambia la demanda de viajes en el sector y perjudica el tiempo que emplean esas vías comúnmente.

Un diseño de rutas basado en un FLP sorteja las dificultades de la situación inusual por medio de cambios sutiles pero beneficiosos de las líneas habituales. Luego, se reestablece el servicio normal, haciendo que los usuarios gocen de un servicio óptimo (o cercanamente óptimo) tanto en la situación usual como en una inusual. Para ello se diseña una heurística denominada *Alternative Line Heuristic* (ALH) que analiza un plan óptimo de la situación inusual, identifica las diferencias y similitudes con el plan usual y adapta las líneas que operan en la ciudad con el principio de modificar lo menos posible para maximizar los beneficios. En el mismo estudio, se demuestra la utilidad de la flexibilidad en las rutas de bus. La Figura 1 ilustra cómo ALH, diseña una nueva línea (línea continua) que define la mejor ruta posible para los usuarios que deben llegar a su destino sin pasar por una zona congestionada. En este ejemplo, se asume que el estadio de la ciudad es la sede de un evento que atrae gran demanda. Los usuarios que no están interesados en asistir al evento, no deberían verse perjudicados por los efectos negativos de usar una línea de bus que pase por esa zona (Ávila-Ordóñez et al., 2022).

Aunque pudiera parecer que los tiempos de viaje usando la línea alternativa serían mucho más altos, no es cierto. Los atascos por el exceso de la demanda, el cierre de calles alrededor del estadio y una velocidad de circulación promedio menor, hacen que la ruta alterna sea más ventajosa. Si bien, el ejem-

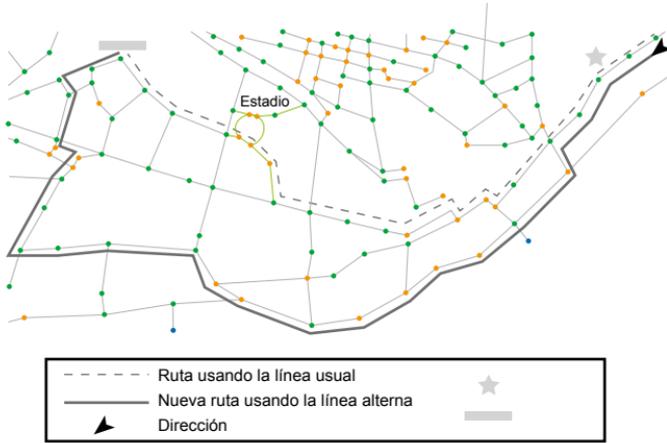


Figura 1. Ejemplo de flexibilidad.

plo de la Figura 1, ilustra una línea alternativa que evade la zona conflictiva, habrán otras líneas capaces de conectar mejor a la demanda generada por el evento. En efecto, la heurística ALH, también diseñará líneas alternativas que mejoren la conexión hacia el estadio. La Figura 2, presenta una línea que evita a los usuarios varias transferencias para llegar hasta la zona del evento.

Pero el número de líneas alternativas, que sustituyen temporalmente a las usuales, deberá ser pequeño para mantener el servicio lo más parecido a lo habitual. El balance entre el beneficio y la estabilidad del servicio es un reto para este tipo de planificación.

La heurística ALH, tiene muchas ventajas, especialmente el hecho de diseñar rápidamente la mejor ruta considerando toda la red; por lo tanto, su solución es cercana al óptimo. Métodos como el indicado, deberían formar parte de la organización del servicio de transporte público de la ciudad, ya que una mejor experiencia de viaje induce a una mayor demanda del servicio.

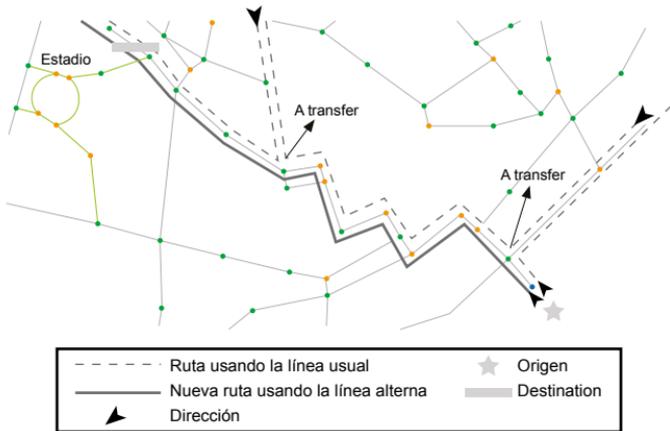


Figura 2. Una línea alternativa para mejorar la conexión hacia el estadio.

Conclusiones, limitaciones y próximos pasos

Este artículo se enfoca en el análisis de la movilidad y el transporte público en la ciudad de Cuenca, al destacar su importancia para el desarrollo sostenible y la calidad de vida de sus habitantes. Se señala que, a pesar de ser un elemento fundamental, existen desafíos significativos en términos de cobertura, eficiencia y calidad del servicio de transporte público. Se aborda la aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial y su impacto en la planificación y gestión del transporte público en Cuenca, subrayando la necesidad de fortalecer la capacitación técnica y el apoyo para los funcionarios locales. Además, se introduce un enfoque innovador llamado *Flexible Line Plan* (FLP) que busca mejorar la flexibilidad y eficiencia de las rutas de autobús, permitiendo ajustes dinámicos en situaciones inusuales.

En el marco de este estudio, se identifican oportunidades para mejorar la calidad del transporte público y su contribución a una ciudad más accesible, segura y sostenible. A través de la implementación de estrategias como el FLP y la formación de alianzas entre diversos actores, se busca optimizar la movilidad en Cuenca y promover un cambio positivo en la percepción y el uso del transporte público. Este artículo también subraya la importancia de abordar integralmente los desafíos de movilidad urbana y ofrece perspectivas valiosas para la planificación y gestión del transporte público en la ciudad.

Un enfoque flexible al transporte público permite ajustarse a las necesidades de sus usuarios, sin embargo, aún hace falta estudiar sobre modos de aplicar las Tecnologías de la Información y Comunicación para informar oportunamente a los usuarios sobre la operación de líneas alternativas. Para el caso de estudio analizado, es decir la ciudad de Cuenca, se deberá validar y calibrar la matriz origen y destino para este modo de transporte y definir una metodología que facilite conocer las nuevas demandas que un evento generarán.

El transporte público en bus, es la clave para una movilidad sostenible por lo que, en el futuro la investigación deberá identificar formas de dotarle incluso de más flexibilidad para atraer una mayor demanda. Es esencial que los actores involucrados formen parte activa de este proceso, por lo que sin duda, se deberían organizar jornadas en las que se discuta sobre este modo de transporte y cómo ofertarlo.

Tomar un bus para llegar a nuestros destinos es un acto de ciudadanía.

Avila-Ordóñez, E., y Vansteenwegen, P. (2015). *Towards a Flexible and Adaptive Planning of Public Transportation: A sensitivity analysis of the Network Design*.

Avila-Ordóñez, E., Tampère, C. M. J., Peralta, P. V., & Vansteenwegen, P. (2022). The design of a flexible bus line plan. *Expert systems with applications*, 203, 117352.

Borndörfer, R., Grötschel, M., y Pfetsch, M. E. (2008). *Models for line planning in public transport*. Springer.

Calderón, F., Vanegas, P. C., y Ávila-Ordóñez, E. (2022). A systematic review of COVID-19 transport policies and mitigation strategies around the globe. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 100653.

Cazorla, P. (2021). A Holistic Decision-Making Process to Improve the Productivity of Public Transportation in Cuenca-Ecuador. *Revista*, 48(2), 33–42.

Ceder, A., y Wilson, N. H. M. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331–344.

Dudley, G., Banister, D., & Schwanen, T. (2019). The dynamics of public participation in new technology transitions: the case of dockless bicycle hire in Manchester. *Built environment*, 45(1), 93–111.

Durán-Micco, J., y Vansteenwegen, P. (2022). A survey on the transit network design and frequency setting problem. *Public Transport*, 14(1), 155–190.

General Assembly, G. (2015). Sustainable development goals. *SDGs Transform Our World, 2030*, 6–28.

Mejía Mejía, V. L. (2015). *Medición de la percepción sobre servicios básicos de la población más vulnerable de la ciudad de Cuenca-Ecuador 2010-2014*. Universidad Politécnica Salesiana.

Municipalidad de Cuenca. (2015). Plan de movilidad y espacios públicos. *Tomo I*, 540.

Sarker, R. I., Mailer, M., y Sikder, S. K. (2020). Walking to a public transport station: empirical evidence on willingness and acceptance in Munich, Germany. *Smart and Sustainable Built Environment*, 9(1), 38–53.

Schöbel, A. (2012). Line planning in public transportation: models and methods. *OR Spectrum. Quantitative Approaches in Management*, 34(3), 491–510.



El sistema de *park and ride* en el entorno urbano de una ciudad media

Jairo Ortega:  0000-0001-5181-9583

János Tóth:  0000-0001-9286-3193

Tamás Péter:  0000-0001-5386-5188

Martin Ortega:  0000-0003-2913-9391

1 Department of Transport Technology and Economics, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest University of Technology and Economics.

2 Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest University of Technology and Economics.

3 Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca.

Puntos clave

- El sistema de P&R permite a las personas aparcar sus vehículos en una ubicación conveniente y luego tomar un medio de transporte público para llegar a su destino final en el centro de la ciudad, reduciendo así la congestión del tráfico y la contaminación en las zonas urbanas.
- La planificación de un sistema de P&R en ciudades medias requiere un análisis cuidadoso de las necesidades y demandas de transporte de la población local, así como la identificación de ubicaciones adecuadas para los P&Rs y la integración con el transporte público existente.

El sistema de *Park & Ride* (P&R) es una política de gestión de transporte que busca reducir la congestión vehicular y promover el uso del transporte público. Se trata de proporcionar estacionamientos para vehículos convencionales en ubicaciones estratégicas en las periferias o dentro del entorno urbano, donde los conductores pueden aparcar sus vehículos y continuar su viaje en transporte público (bus, tranvía, metro) hacia áreas congestionadas o de alta demanda, como el centro de la ciudad (Ortega, Tóth, y Péter, 2021b). Al disminuir la cantidad de vehículos convencionales circulando en zonas críticas, el sistema P&R, contribuye a la reducción de la contaminación atmosférica y al fomento de la movilidad sostenible en entornos urbanos (Ortega, 2022). Este tipo de sistema ha sido implementado en varias ciudades alrededor del mundo, ofreciendo a los usuarios la posibilidad de estacionar sus vehículos en áreas designadas y utilizar el transporte público para llegar a sus destinos en el centro de la ciudad.

La planificación de un sistema de P&R demanda una secuencia de etapas meticulosas para asegurar un funcionamiento eficiente y cumplir con los objetivos de disminuir la congestión vehicular y fomentar el uso del transporte público. La Figura 1, ilustra los componentes clave de un sistema P&R que deben ser considerados en el proceso de planificación.

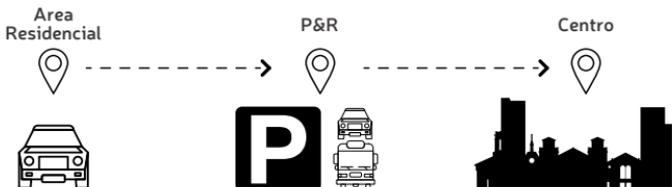


Figura 1. Funcionamiento de un sistema de P&R.

Este capítulo aborda de manera integral nuestras investigaciones sobre planificación de un sistema de P&R en Cuenca, Ecuador, como ejemplo de ciudad intermedia, para promover el

uso del transporte público y reducir la congestión vehicular y la contaminación ambiental.

Para brindar un enfoque académico y técnico, los resultados se han organizado en diversas subsecciones. En primer lugar, se presentan los criterios utilizados para seleccionar las ubicaciones más adecuadas del sistema de P&R. En segundo lugar, se determinan estas ubicaciones basadas en los criterios previamente definidos y se mapean las áreas de captación del sistema de P&R en Cuenca. Finalmente, se explica cómo la integración del sistema de P&R con vehículos eléctricos y autónomos puede reducir la emisión de contaminantes.

Criterios para la ubicación de un sistema de P&R

En las investigaciones publicadas en Ortega, Moslem, et al. (2021) y Ortega, Moslem, et al. (2023) hemos propuesto 6 criterios principales y 19 subcriterios para seleccionar la ubicación y la implementación de un sistema de P&R a partir del PMUS (Plan de Movilidad Urbana Sustentable) de Cuenca y de criterios propios del funcionamiento del sistema de P&R para una ciudad intermedia. La Tabla 1 resume estos criterios.

Para determinar la importancia relativa de los criterios y subcriterios en la selección de ubicaciones para el sistema de P&R empleamos técnicas de toma de decisiones multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés), que permiten evaluar múltiples factores y ponderar su importancia relativa en un contexto específico. Los métodos multicriterio utilizados fueron: Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Ortega y Moslem, 2023); Best Worst Method (BWM) (Ortega, Tóth, Moslem, et al., 2020), y una combinación de ambos AHP-BWM. Los participantes son expertos en el área de Transporte y Movilidad de la ciudad de Cuenca.

Los resultados de la ponderación de las opiniones de los participantes en los MCDM indican que la Accesibilidad al Transporte Público (C3) emerge como el criterio de mayor importancia en la selección de ubicaciones para sistemas de P&R.

Tabla 1. Criterios principales y secundarios para seleccionar la ubicación del sistema de P&R (Ortega, Tóth, y Péter, 2021a)

Criterios		Subcriterios	
C1	Distancia	C1.1	Distancia de las zonas al sistema P&R
		C1.2	Distancia del sistema P&R al centro de la ciudad
C2	Condiciones del tráfico en la ruta (origen-destino)	C2.1	Tiempo de viaje en vehículo convencional
		C2.2	Tiempo de viaje en transporte público
		C2.3	Tiempo de viaje a través del sistema de sistema P&R
C3	Accesibilidad del transporte público	C3.1	Frecuencia del transporte público
		C3.2	Tiempo de traslado desde el sistema P&R hasta la parada de transporte público
		C3.3	Distancia del P&R a la parada de transporte público más cercana
C4	Aspectos del transporte	C4.1	Reducción de viajes en coche privado en CBD
		C4.2	Aumento de la demanda en transporte público en CBD
C4	Aspectos del transporte	C4.3	Número de conexiones de transporte público disponibles
		C4.4	Demanda de aparcamiento en un sistema P&R

Este hallazgo enfatiza la relevancia de la interacción entre el sistema P&R y el transporte público, subrayando que la eficacia de un sistema P&R depende, en gran medida, de su capacidad para conectarse de manera adecuada y eficiente con las redes de transporte público existentes.

Criterios		Subcriterios	
C5	Económicos	C5.1	Coste de implantación del proyecto
		C5.2	Coste del uso del suelo
		C5.3	Coste de la implantación de la infraestructura de telecomunicaciones
		C5.4	Coste total del mantenimiento de la inversión
C6	Medioambientales	C6.1	Reducción de CO2
		C6.2	Reducción del ruido
		C6.3	Superficie ocupada

Cálculo de la ubicación de un sistema de P&R para la ciudad de Cuenca – Ecuador

71

Los PMUS proporcionan información relevante sobre las políticas de movilidad que deben aplicarse a corto, mediano y largo plazo en una ciudad. Además, son fuentes de datos e información que describen aspectos relacionados con la movilidad, como la clasificación del uso del suelo según la actividad de cada zona urbana (ej. residencial, comercial, recreativa y agrícola). Asimismo, presentan divisiones geográficas de la ciudad en distritos, zonas y barrios.

Con esta información es posible determinar qué tipo de actividad origina los viajes de P&R y verificar, mediante un algoritmo, la eficiencia de la selección del inicio del viaje calculando y comparando los atributos de los viajes óptimos realizados por los usuarios potenciales de P&R, desde el punto de origen hasta diferentes instalaciones de P&R en función de varias métricas (ej. distancia, tiempo sin tráfico, tiempo con tráfico).

En Ortega et al. (2019) llevamos a cabo un análisis de regresión lineal sobre un conjunto de posibles ubicaciones de P&R para determinar la más apropiada, se identificaron 7 (ver Tabla 3).

Tabla 3. Coordenadas de ubicación del sistema de P&R ID

ID	Latitude	Longitude
A	-2.9233990	-79.0382343
B	-2.9147923	-79.0382270
C	-2.8956061	-79.0268517
D	-2.9066296	-79.0293574
E	-2.8970630	-78.9902306
F	-2.8861158	-78.9929826
G	-2.8818860	-78.9776599

Posteriormente se desarrolló un algoritmo para evaluar y discernir cuál de las estaciones de P&R resulta más atractiva en términos de eficiencia y accesibilidad. Dicho algoritmo tomó en cuenta criterios como la distancia directa, la distancia en carretera y los tiempos de desplazamiento tanto en condiciones de tráfico reducido como en situaciones de tráfico intenso. La Tabla 4 indica, para cada una de las 15 zonas identificadas en el PMUS de Cuenca, la ubicación de P&R más cercano.

Es importante destacar que la zona 5 presenta una peculiaridad en la columna de tiempo de viaje bajo tráfico reducido, donde se indica "F-E-E-E-E" en lugar de una única letra. Esto representa los 5 días laborales de la semana, es decir el lunes las personas escogerían el sistema de P&R de ubicación F, mientras los demás días la ubicación E.

Mapeo de las áreas de captación del sistema de P&R

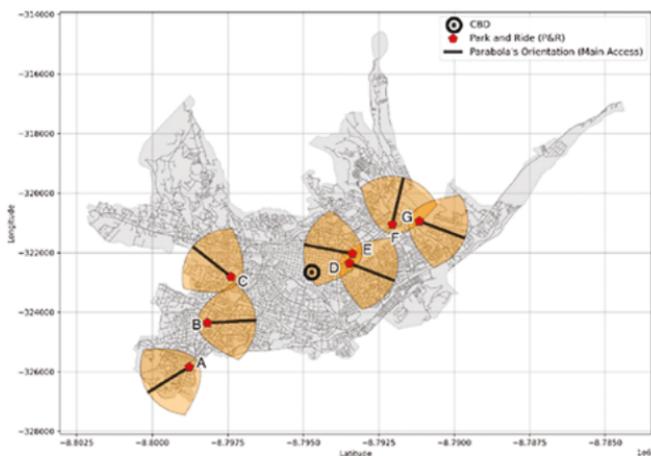
El área de captación de las instalaciones de P&R se reconoce como un elemento fundamental para la planificación del sistema (Ortega, Tóth y Tamás, 2020a). En ese sentido, el método de la

Tabla 4. Instalación de P&R más cercana a cada zona (Ortega, Rizopoulos, et al., 2022)

Zonas	Distancia		Tiempo de viaje	
	Línea recta	Red vial	Bajo tráfico	Alto tráfico
1	C	C	C	C
2	C	C	C	C
3	B	B	B	B
4	F	F	F	F
5	E	E	F-E-E-E-E	E
6	E	E	E	E
7	E	E	E	E
8	E	E	E	E
9	C	C	D	D
10	E	E	E	E
11	G	G	G	G
12	F	F	F	F
13	E	E	E	E
14	E	E	G	E
15	G	G	G	G

parábola puede utilizarse para visualizar esas formas geométricas en mapas digitales de un entorno urbano (Ortega, Tóth, et al., 2022). Puede implementarse como un programa informático que integre las variables que representan los elementos del sistema P&R, así como el conjunto de ecuaciones que se utilizan en el sistema de información geográfica (SIG) (Ortega, Tóth y Péter, 2020).

La Figura 2, muestra un mapa de las instalaciones potenciales del sistema de P&R, así como su área de captación. Los resultados exhiben cómo la parábola de cobertura abarca gran



74



Figura 2. Mapeo de las áreas de captación del sistema de P&R

parte del entorno urbano de la ciudad de Cuenca. No obstante, también se puede observar que existen áreas que no están cubiertas por el sistema P&R, lo cual podría ser objeto de análisis y consideración en futuras mejoras del sistema.

Reducción de emisiones en la interacción del sistema de P&R con vehículos eléctricos y vehículos autónomos.

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es un objetivo esencial en la lucha contra el cambio climático. En este contexto, el P&R, combinado con vehículos eléctricos y autónomos, puede jugar un papel crucial.

La Tabla 5 presenta los resultados de la reducción de contaminación (emisiones que produce el automotor) al implementar el sistema de P&R y combinarlo con vehículos autónomos (AV) y vehículos eléctricos (EV) en el *software* Copert (Ntziachristos et al., 2009). Los porcentajes reflejan la disminución en la emisión de diversos contaminantes, incluidos NO_x, CO y CO₂.

Tabla 5. Reducción de contaminación al implementar el sistema de P&R y combinar con vehículos autónomos (AV), y vehículos eléctricos (EV)

	NO _x	CO	CO ₂
P&R	16%	16%	20%
P&R + EV	39%	38%	42%
AV + P&R	20%	10%	13%
AEV + P&R	34%	34%	35%

La implementación exclusiva del sistema P&R conlleva una reducción del 16 % en las emisiones de NO_x y CO, así como del 20 % en las emisiones de CO₂ (Ortega et al., 2023). Al fusionar el sistema P&R con EV, se evidencia una disminución considerablemente mayor en la emisión de contaminantes, alcanzando el 39 % en NO_x, el 38 % en CO y el 42 % en CO₂ (Obaid et al., 2021). Por otra parte, al integrar AV con el sistema P&R, se obtiene una reducción del 20 % en NO_x, del 10 % en CO y del 13 % en CO₂ (Ortega, Tóth y Tamás, 2020b). Por último, al incor-

porar vehículos autónomos eléctricos (AEV) al sistema P&R, se logra una disminución del 34 % en NO_x y CO y del 35 % en CO₂ (Ortega et al., 2021).

En síntesis, al combinar la implementación de vehículos eléctricos y autónomos en conjunto con el sistema P&R, se puede alcanzar una reducción significativa en la emisión de contaminantes atmosféricos.

Conclusión

Este capítulo se ha centrado en explorar la implementación de un sistema de P&R en una ciudad intermedia de América Latina, Cuenca, Ecuador. Nuestra indagación ha abordado el intrincado proceso de planificación, desde la decisión inicial de las ubicaciones hasta la compleja interacción con los vehículos eléctricos y autónomos.

La aplicación de enfoques multicriterio nos ha permitido discernir cuáles serán más propensos a ser adoptados por los planificadores urbanos para la implementación del sistema P&R. A través de análisis matemático, hemos sido capaces de determinar no solo la ubicación más atractiva para el sistema P&R, sino también su rango de influencia. El método de mapeo parabólico nos ha proporcionado información valiosa sobre el área de cobertura de cada P&R.

Este estudio se ha centrado en la interacción del sistema P&R con los vehículos eléctricos y autónomos, lo que ha permitido examinar su potencial como política orientada a reducir la contaminación. No obstante, reconocemos ciertas limitaciones en este análisis. Hemos basado nuestros datos en una ciudad media de Ecuador, y consideramos que sería interesante extender el estudio a ciudades de mayor complejidad como Quito o Guayaquil, o a su vez, a ciudades más pequeñas como Azogues.

Además, nuestro enfoque se ha centrado en el sistema P&R vinculado al transporte público, sin considerar otras formas de transporte, como la micromovilidad o el transporte en bicicleta. Teóricamente, este sistema puede implementarse

desde cero, pero reconocemos que, en la práctica, las condiciones de movilidad podrían cambiar, lo que requeriría actualizaciones en la información para implementar varios sistemas de P&R en Cuenca.

Uno de los desafíos para la implementación de este sistema es asegurar un nivel de servicio adecuado en el transporte público que, en combinación con el sistema de P&R, pueda reducir los tiempos de viaje. Sin embargo, existe incertidumbre respecto a la disposición de los usuarios para adoptar este sistema. En este sentido, los planificadores de transporte deberían tener en cuenta los costos de transporte y explorar alternativas que promuevan su uso, como sistemas de pago único o tarifas homologadas. Para detalles más exhaustivos, se recomienda consultar las publicaciones referenciadas en el presente capítulo.

En resumen, este capítulo proporciona una primera incursión en la implementación del sistema de P&R en una ciudad intermedia en Ecuador. Sin embargo, queda claro que se necesitan adaptaciones futuras, tanto en la esfera académica como práctica.

Referencias

Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., y Samaras, Z. (2009). COPERT: A European road transport emission inventory model. *Environmental Science and Engineering (Sub-series: Environmental Science)*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88351-7-37>

Obaid, M., Torok, A., y Ortega, J. (2021). A comprehensive emissions model combining autonomous vehicles with park and ride and electric vehicle transportation policies. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/SU13094653>

Ortega, J. (2022). *An Integral Study of Park and Ride for Urban Mobility* [Budapest University of Technology and Economics]. https://www.researchgate.net/publication/368137685_

AN INTEGRAL STUDY OF PARK AND RIDE FOR URBAN MOBILITY

Ortega, J., Lengyel, H., y Ortega, J. (2023). Design and Analysis of the Trajectory of an Overtaking Maneuver Performed by Autonomous Vehicles Operating with Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS) and Driving on a Highway. *Electronics (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12010051>

Ortega, J., Rizopoulos, D., Tóth, J., y Péter, T. (2022). Land Use as a Criterion for the Selection of the Trip Starting Locations of Park and Ride Mode Travelers. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 50(1), 88-100. <https://doi.org/10.3311/PPTR.16383>

Ortega, J., Tóth, J., y Péter, T. (2020). Mapping the catchment area of park and ride facilities within urban environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/IJGI9090501>

Ortega, J., Tóth, J., y Péter, T. (2022). Applying Geographic Information System Methodologies to Estimate the Catchment Area Accessibility of Park-and-Ride Facilities. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 50(1), 69-78. <https://doi.org/10.3311/PPTR.16384>

Ortega, J., Tóth, J., y Tamás, P. (2019). Estimation of parking needs at Light Rail Transit System stations/ISBN 978-963-8121-85-1. En Conference on Transport Sciences 2019 (Ed.), *Conference on Transport Sciences 2019*. Conference on Transport Sciences 2019. https://www.researchgate.net/publication/331976894_Estimation_of_parking_needs_at_Light_Rail_Transit_System_stationsISBN_978-963-8121-85-1

Ortega, J., Tóth, J., y Tamás, P. (2020a). A spatial study of the catchment area of P&R facilities. En International Conference on Transport Sciences (Ed.), *International Conference on Trans-*

port Sciences. International Conference on Transport Sciences. https://www.researchgate.net/publication/341978299_A_spatial_study_of_the_catchment_area_of_PR_facilities

Ortega, J., Tóth, J., y Tamás, P. (2020b). A theoretical analysis of car emission levels related to the implementation of a Park and Ride in an urban environment. En PANAM (Ed.), *PANAM*. https://www.researchgate.net/publication/353830620_A_theoretical_analysis_of_car_emission_levels_related_to_the_implementation_of_a_Park_and_Ride_in_an_urban_environment

Ortega, J., Tóth, J., y Tamás, P. (2021). Analyzing pollution reduction by combining the P&R system with electric vehicles. En Conference on Transport Sciences (Ed.), *Conference on Transport Sciences*. https://www.researchgate.net/publication/352313010_Analyzing_pollution_reduction_by_combining_the_PR_system_with_electric_vehicles



Sistema de transporte Bici Pública Cuenca: desafíos y oportunidades

Lisseth Molina:  0009-0002-1995-144X

Adriana Quezada^{1,2}:  0000-0002-2335-8422

Daniel Orellana^{1,2}:  0000-0001-8945-2035

¹ LactaLAB–Ciudades Sustentables, Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población, Universidad de Cuenca, Ecuador.

² Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca, Ecuador.

Puntos clave

- En 2020, la Bicicleta Pública alcanzó 5 300 viajes y 680 usuarios en un mes. En 2022 las cifras cayeron drásticamente.
- Las preferencias de movilidad están cambiando respecto al 2015. Hay una tendencia a dejar el auto por medios de transporte más sostenibles.
- Las estrategias para incentivar el uso del sistema, están relacionadas con su expansión, infraestructura ciclista y manejo de datos.

18

Contexto

Desde 1960, la bicicleta compartida se expandió a nivel mundial, convirtiéndose en una herramienta clave para la planificación de la movilidad urbana. Actualmente, existen 1 590 ciudades que poseen estos sistemas, la mayoría de ellos situados en Norteamérica, China y Europa (Yue y Hassan, 2023). En América Latina, los sistemas de bicicleta compartida han crecido significati-

vamente, de 4 en 2010, a 92 en 2019 (Binatti et al., 2022), año en el que se inauguró la bicicleta pública en Cuenca.

Aunque la implementación de la bicicleta compartida varía de un lugar a otro, los principales factores que inciden en el éxito o fracaso del sistema están relacionados con la integración del sistema con otros servicios de transporte público, demanda futura, seguridad, modelos de negocio, costos, comodidad para el usuario (Bejarano et al., 2017), infraestructura ciclista, política pública y procesos de participación ciudadana.

En este sentido, es relevante entender el funcionamiento de Bici Pública Cuenca, pues, al ser el único sistema de bicicleta compartida de tercera generación en el Ecuador, sus aprendizajes pueden marcar las directrices de implementación en otras ciudades del país, así como también, plantear estrategias a nivel local para promover su uso y planificar su expansión.

Este capítulo presenta un análisis del Sistema de Transporte Bici Pública Cuenca (STBP), desde su implementación en 2019, hasta diciembre del 2022. Durante este periodo se han desarrollado una serie de estudios enfocados en la evolución del funcionamiento del sistema y la percepción de sus usuarios y la ciudadanía en general, a fin de identificar las oportunidades y desafíos que afronta la adopción del sistema.

El contenido que se presenta a continuación, es el compendio de dos estudios relacionados al STBP: i) la veeduría ciudadana (Molina et al., 2020) y ii) la consultoría para TUMI – DATA “Datos para una movilidad sostenible” (CERCANA et al., 2023).

Para un entendimiento general del STBP, este capítulo se presenta en cinco secciones: i) características generales, ii) patrones de uso, iii) percepción ciudadana, iv) desafíos y oportunidades, y v) recomendaciones.

Características generales

Bici Pública Cuenca es un sistema de bicicletas compartidas de tercera generación, dirigido a la población mayor de edad. Está conformado por 20 estaciones y 240 bicicletas distribuidas en-

tre el Centro Histórico de la ciudad y el sector de El Ejido, dos zonas relativamente planas, pero separadas por una topografía pronunciada. Las estaciones se ubican próximas a puntos de interés como universidades, mercados, plazas, parques y otros equipamientos como el estadio o el terminal terrestre. El sistema dispone de dos tipos de membresía, las cuales se pueden utilizar a través de una aplicación móvil, una tarjeta o un código de usuario. Aunque contractualmente y en la página web del sistema se mencionan cuatro opciones de membresía (anual, trimestral, turística o diaria y por viaje); actualmente solo se puede adquirir la membresía anual (\$30) y la membresía para turistas (\$10).

El Sistema Bici Pública Cuenca nace en 2018 con la figura jurídica de alianza público-privada, entre la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte [EMOV EP] y el consorcio privado BICICUENCA S.A. Bajo esta lógica, la EMOV EP actúa como ente auditor del servicio, pero también invierte económicamente de forma anual, y debe garantizar que los recursos asignados se utilicen para mejorar el sistema y promover su uso; aunque contractualmente existen limitaciones que dificultan esas actividades.

Con estos antecedentes, la inserción de bicicletas públicas en Cuenca, generó gran interés por parte de la ciudadanía; alcanzando alrededor de 5 000 inscritos durante los cuatro primeros meses de funcionamiento, y 538 usuarios activos. Para entender mejor la curva de uso del STBP, en la siguiente sección se presenta un análisis espacio temporal más detallado.

Patrones de uso del STBP

Durante el primer año (marzo 2019 a marzo 2020), el sistema tuvo un crecimiento importante: en enero del 2020 alcanzó un total de 5 300 viajes y 430 usuarios, con un pico de 270 viajes y 145 usuarios diarios. Sin embargo, en abril del 2020 el uso del sistema cayó fuertemente debido a la pandemia de COVID-19, y aunque mostró signos de recuperación, en junio del mismo año las cifras de uso decrecieron nuevamente. Desde

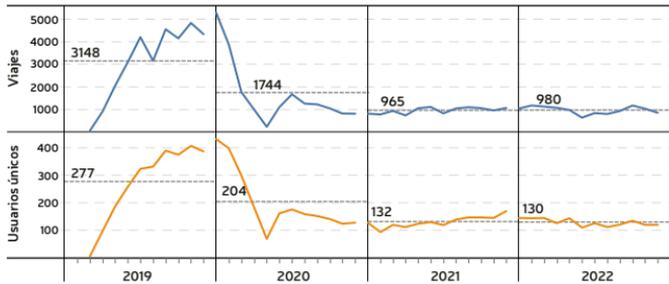


Figura 1. Curva de evolución de uso del STBP entre 2019 y 2022.

ahí se ha mantenido relativamente estable con poco menos de 1 000 viajes y 130 usuarios únicos al mes (Figura 1). Para finales del 2022, el promedio diario fue de 21 usuarios y 33 viajes.

En cuanto al horario predominante de uso del sistema, los resultados muestran que, antes de la pandemia el patrón de uso diario entre semana fue mucho mayor que los fines de semana; evidenciando una predominancia de viajes utilitarios de trabajo y estudio frente a viajes recreativos, con picos de uso relevantes a las 13:00. Sin embargo, luego de la pandemia la diferencia del uso entre semana disminuyó con respecto a los fines de semana, por lo que, se podría pensar que el uso utilitario ha disminuido más que el uso recreativo.

Con este análisis, es evidente que la pandemia marcó un hito importante en el proceso de inserción del STBP, siendo el único medio de transporte de la ciudad que no ha podido recuperar los niveles de uso previos a la pandemia.

Desde el punto de vista espacial, el análisis de flujos dominantes muestra que la Bici Pública se utiliza poco para ir hacia el Centro Histórico, y los flujos de destinos predominantes se concentran en el sector de El Ejido (Figura 2).

A pesar de que El Ejido concentra menos oportunidades urbanas que el Centro Histórico, es una zona que posee más infraestructura ciclistica, calles pavimentadas y una topografía relativamente plana. Esto confirma la suposición de que la falta de conectividad y cicloinfraestructura está incidiendo fuertemente en el uso del sistema. Cabe recalcar que, los recorridos entre las

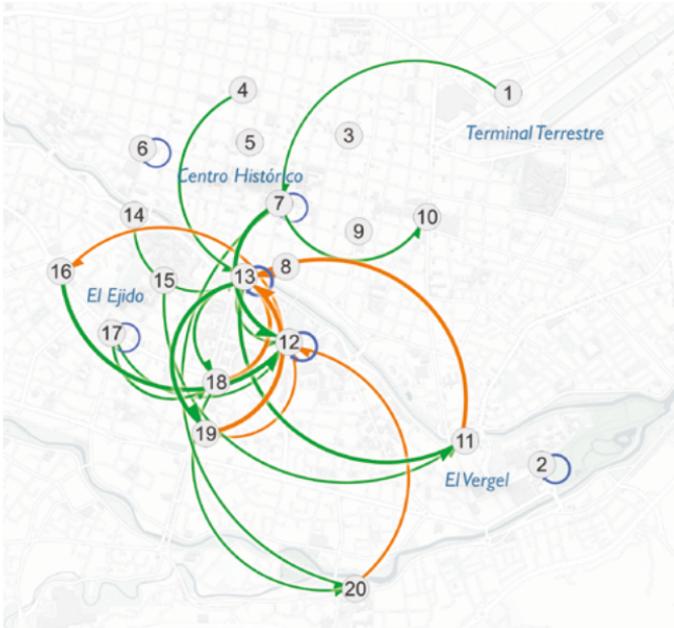


Figura 2. Flujos predominantes del STBP entre 2019 y 2022.

estaciones utilizan 69 km de red vial, pero solo el 8 % cuenta con ciclovías (6 km).

Finalmente, a partir de un análisis de Origen y Destino (OD), se determinó que las estaciones de El Centenario (13), Parque de La Madre (12) y Parque Calderón (7) son las más utilizadas. Uno de cada 4 viajes inicia en esas estaciones, y uno de cada 5 se dirige hacia el Parque de la Madre o el Centenario. Es interesante que, en el ranking de destinos, aparecen las estaciones de El Vergel (11) y Universidad del Azuay (20) en tercer y quinto puesto, respectivamente. La cercanía de estas estaciones a campus universitarios podría explicar esta preferencia, que aparece desde antes de la pandemia y se mantiene luego del retorno a clases presenciales.

Luego de tener un contexto general y geoespacial del STBP, es relevante entender los aspectos perceptuales de la población local que inciden en su preferencia por el uso de la bicicleta compartida.

Con este fin, a través de una encuesta en línea (CERCANA et al., 2023), se determinaron los patrones de movilidad urbana de la población en Cuenca, sus preferencias y las principales motivaciones para usar o no el STBP.

A nivel general, los resultados muestran que, los patrones de movilidad urbana según el género se mantienen igual que años anteriores, la población femenina se desplaza principalmente en bus y la masculina en auto (como conductor), moto y bicicleta; y la mayor parte de ciclistas urbanos se concentra en el grupo etario de 19 y 36 años.

En cuanto a las preferencias de movilidad, hay un gran potencial en la población estudiantil y trabajadora. Sin importar su género ni su condición socioeconómica, aspiran a utilizar medios de transporte no motorizados, eléctricos y masivos (concretamente el tranvía), para movilizarse cotidianamente.

Sobre el uso del sistema Bici Pública Cuenca, a continuación, se presenta lo siguiente: 1. Las razones para inscribirse o no en el STBP (respuestas de no usuarios), 2. Las razones para usar o no el STBP (respuestas de usuarios y exusuarios), y 3. Las sugerencias para Bici Pública (respuestas de usuarios, exusuarios y no usuarios).

Los encuestados que no están inscritos en el STBP, indican que la principal razón para no ingresar es la falta de estaciones, seguida del clima, el costo y el temor a accidentes de tránsito. Por otro lado, indican que, las principales motivaciones para inscribirse, están relacionadas con la salud, el interés por el ambiente y el deporte.

Por otra parte, los usuarios del STBP indican que las principales razones para ocupar el servicio, son el ahorro de tiempo y el deporte. Mientras que, los exusuarios señalan que la principal razón para abandonar el sistema fue la falta de es-

taciones cercanas, coincidiendo con las personas que no están inscritas. A esta condición se suma que las bicicletas se encuentran en mal estado, la infraestructura ciclista es insegura y hay un tiempo limitado; de acuerdo con su experiencia.

En cuanto a las sugerencias para mejorar el STBP, los usuarios, exusuarios, y no usuarios, indican principalmente la necesidad y aspiración de contar con estaciones cercanas a los lugares de residencia, trabajo o estudio fuera de la zona del Centro Histórico de Cuenca. También sugieren que el proceso de inscripción sea más amigable, mejorar el estado de las bicicletas, mejorar la aplicación móvil y contar con una plataforma que facilite al usuario al momento de escoger rutas de acuerdo al destino de su viaje y conveniencia.

Desafíos y oportunidades

En 2015, el Plan de Movilidad de Cuenca señaló que el 43 % de la población se movilizaba en bus, el 36 % en auto, y el porcentaje restante se movilizaba caminando, en taxi, moto o bicicleta. Pero, si tuvieran la posibilidad de elegir, el 65% optaría por movilizarse en auto particular. Esta cifra fue una de las primeras alertas, sobre todo para los tomadores de decisión, considerando que entonces el crecimiento del parque automotor en Cuenca ya era acelerado, pues aumentaba más rápido que su población.

Cuatro años después (2019), se inauguraron en la ciudad dos nuevos medios de transporte público, el tranvía y la bicicleta compartida; además, se implementaron iniciativas privadas como la bicicleta, el auto y el scooter eléctrico.

En 2023, los patrones generales de movilidad en Cuenca se mantienen. Sin embargo, a diferencia del 2015, las preferencias de movilidad están cambiando: la población estudiantil y trabajadora aspira a abandonar el bus y el auto para utilizar medios de transporte no motorizados, eléctricos y masivos (específicamente el tranvía). En 2015, el 33 % de las personas que ocupaban bus, deseaban abandonarlo, principalmente para movilizarse en auto. Actualmente, según la encuesta analizada

en este capítulo, el 83 % de personas que ocupa bus, aspira a cambiarlo mayoritariamente por la bicicleta eléctrica o manual, y por el tranvía.

En 2015 solamente el 8 % de la población que se movilizaba en auto, deseaba abandonarlo. Actualmente, según la encuesta mencionada, esa cifra ha crecido al 32 %. Parecería ser que los cambios en los paradigmas de movilidad de Cuenca hacia medios más sostenibles, han sido provocados por la dispersión urbana y el caos vehicular; más que por las posibilidades que la ciudad ofrece en cuanto a infraestructura y calidad de sus servicios de transporte público.

No obstante, la Bici Pública no aparece como un medio al que la población local desearía cambiar. De hecho, la disminución progresiva de usuarios, ha provocado que se analice el comportamiento del sistema desde los aspectos técnicos, hasta los perceptuales; y se ha evidenciado la necesidad urgente de expandir el sistema hacia zonas de alta densidad poblacional, mejorar la infraestructura ciclística, y contar con un sistema de monitoreo constante.

Es importante mencionar que, los estudios que se han realizado para evaluar el STBP y plantear soluciones que incrementen su uso han sido iniciativas ciudadanas o de consultoras externas que, si bien han tenido la participación de entidades municipales, no ha sido directamente la EMOV EP o el consorcio BICUENCA S.A., quienes han liderado o participado activamente de estos procesos. Este fenómeno se entiende desde la parte contractual, pues legalmente se establece que, el único indicador para evaluar el STBP es el nivel de servicio. Es decir que, durante las horas hábiles del sistema, todas las estaciones tengan bicicletas disponibles y en buen estado.

Sintetizando, Cuenca se enfrenta con varios desafíos que inciden directa o indirectamente en el uso de la bicicleta compartida. Entre estos está el crecimiento acelerado del parque automotor, sin políticas que desincentiven su uso, una población insatisfecha con el sistema de buses públicos, una infraestructura ciclística que ha crecido, pero que no cubre las necesidades actuales; y un sistema de bicicleta compartida cuyos inversores públicos y privados, no han presentado un diseño parcial o in-

tegral para superar el déficit de usuarios actual, hasta el término del contrato en 2028.

Sin embargo, frente a este panorama, también se visibilizan oportunidades útiles para los tomadores de decisión. Las autoridades podrían aprovechar que gran parte de la población ha manifestado su aspiración por cambiar el uso del auto hacia medios de movilidad más sostenibles, y planificar estrategias a corto plazo que sean monitoreadas y evaluadas para una implementación permanente. En el mismo sentido, se debe aprovechar la dinámica de trabajo interinstitucional que caracteriza a Cuenca, y utilizar los estudios científicos realizados por la academia, conjuntamente con los criterios técnicos y legales establecidos por los actores públicos y privados; para discutirlos conjuntamente, y evaluar la factibilidad de múltiples acciones que promuevan el uso del STBP.

Recomendaciones

Según la curva de adopción tecnológica de Everett Rogers, en la primera etapa de inserción de un nuevo sistema, los usuarios se preocupan principalmente por la tecnología y el rendimiento, es decir, la función sobre la forma. Mientras que, en las fases posteriores, los usuarios se preocuparán por la comodidad, la experiencia de uso y la calidad. El STBP se encuentra en las primeras fases de adopción, con riesgo de caer en el valle de la muerte (*chasm*). En ese sentido, es importante que se prioricen las acciones, desde la utilidad del sistema, hasta las especificidades de su servicio. En ese orden, se recomienda lo siguiente:

1. Planificar la expansión del sistema y solventar la falta de estaciones, desde los orígenes de los viajes, es decir, contar con estaciones cercanas a las zonas con más densidad poblacional.
2. Reforzar la continuidad y la calidad de la infraestructura ciclística en la ciudad. Se ha evidenciado que llegar a la mayor parte de estaciones a pie o en bicicleta, representa un recorrido conflictivo e inseguro para los usuarios. Se debe

eliminar las barreras físicas que existen para llegar y utilizar las estaciones.

3. Ampliar las opciones de membresía que ofrece el STBP. La disponibilidad de una membresía anual y otra turística o diaria, limita la posibilidad de que los usuarios interesados prueben el sistema y decidan si quieren adquirirlo de forma permanente.
4. Alinear los datos que genera BICICUENCA S.A. al protocolo GFBS (Especificaciones Generales de Suministro de Datos para las Bicicletas Compartidas) para poder obtenerlos en tiempo real. A su vez, la EMOV EP debe tener la capacidad de manejar una base de datos propia que permita la utilización discrecional de la información, así como apertura o procesamiento a demanda.
5. Implementar indicadores de gestión del STBP que permitan su evaluación como ingresos mensuales por tipo de membresías, viajes acumulados, viajes del mes, viajes diarios promedio, bicicletas operativas promedio, usuarios totales activos, usuarios que viajaron en el mes, usuarios nuevos del mes, usuarios que viajan por día en promedio, turistas que viajaron en el mes (de existir la distinción en la base), reparaciones realizadas por tipo, ranking de mayores y menores vínculos entre estaciones de origen/destino, tiempos de viaje promedio entre estaciones, siniestros, bicicletas robadas, costo real por cada viaje, relación costo / tarifa / proyección, tiempo neto de disponibilidad, total y por estación.
6. Monitorear y mejorar las condiciones de las bicicletas. En este estudio se identificó, por parte de usuarios, exusuarios, y participantes voluntarios, que las bicicletas tienen fallencias en relación a llantas, asientos y mantenimiento. Adicionalmente, existen limitaciones del usuario para usar la aplicación móvil, así como también para inscribirse y acceder al servicio. Estas condiciones, posiblemente desmotivan a usar el sistema y dan lugar a preferir movilizarse en una bicicleta propia, como se evidenció en la encuesta.

Referencias

Bejarano, M., Ceballos, L. M., y Maya, J. (2017). A user-centred assessment of a new bicycle sharing system in Medellín. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 44, 145–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.11.004>

Binatti, G., Batalha, Y., De Castro, J., y Oliveira, M. (2022). Latin American bike sharing system overview: from data collection to implementation model portraits. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e20210066>

CERCANA, SMOD, y LlactaLAB. (2023). *Implementación de un piloto de análisis de datos y apoyo al mejoramiento de la operación del sistema de bicicletas públicas de Cuenca como parte del proyecto "TUMI-DATA, Datos para una movilidad sostenible"*.

Molina, L., García, L., Álvarez, N., López, J., Bernal, M., Albornoz, F., Cobo, D., Fajardo, D., Machado, F., Crespo, C., y Peralta, E. (2020). *Informe legal y técnico de la Veeduría ciudadana para vigilar y acompañar el proceso de contratación e implementación del Sistema Bici Pública en la ciudad de Cuenca - Ecuador*. <http://www.cpccs.gob.ec/wp-content/uploads/2020/03/informes-de-veeduria-dag-de-cuenca-transito-transporte.pdf>

Yue, Q., y Hassan A, K. (2023). Evolvment patterns of usage in a medium-sized bike-sharing system during the COVID-19 pandemic. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104669>



Control energético tranviario mediante el uso de hidrógeno y supercapacitores

Paul Arévalo^{1,2}  0000-0002-6721-1326

Antonio Cano¹  0000-0002-6440-021X

Francisco Jurado¹  0000-0001-8122-7415

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Jaén, 23700
EPS Linares, Jaén, España.

² Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Telecomunicaciones,
Universidad de Cuenca, Cuenca, 010107, Ecuador.

Puntos clave

- El tranvía de Cuenca podría ser alimentado con sistemas basados en energías renovables, hidrógeno y sistemas de almacenamiento energético.
- Según simulaciones con datos reales, estos sistemas serían factibles en términos energéticos y económicos.
- Uno de los modelos propuestos permitiría que el tranvía funcione sin una estructura de catenarias y sea completamente autónomo.
- La propuesta ha logrado reducir los costes energéticos radicalmente con respecto a la actualidad.

93

Introducción

La creciente adopción de fuentes de energía renovable, debido al agotamiento de los combustibles fósiles a nivel global, ha impulsado el desarrollo de diversas técnicas de gestión energética. Estas técnicas se están utilizando tanto para abastecer las cargas conectadas a la red como para respaldar el transporte público sostenible, incluyendo los tranvías eléctricos (Arévalo et

al., 2020) . Sin embargo, el suministro energético de un tranvía difiere del de una carga eléctrica habitual debido a las fluctuaciones abruptas de potencia durante las aceleraciones y paradas de sus vagones.

Actualmente, el tranvía de Cuenca se alimenta a través de la red de suministro eléctrico de distribución, con subestaciones individuales colocadas a lo largo de su recorrido. La energía depende de la red eléctrica nacional y de sus fuentes primarias, que en el caso de Ecuador incluyen una combinación de centrales convencionales (diésel, bunker o carbón) y fuentes renovables (hidroeléctrica, solar o eólica) (Arévalo et al., 2021). Sin embargo, la dependencia de la red eléctrica nacional representa un desafío para el control y la reducción de las emisiones de carbono a nivel local. Por lo tanto, varios estudios proponen distintas fuentes de propulsión para el tranvía con el objetivo de reducir las emisiones de carbono. Por ejemplo, en la ciudad de Zaragoza, España, se han propuesto diversas técnicas de control energético para evaluar la factibilidad de un tranvía alimentado principalmente por celdas de hidrógeno, supercapacitores y baterías (García et al., 2012). De manera similar, en la ciudad de Sevilla, España, se han realizado estudios sobre un tranvía alimentado por celdas de combustible y baterías de níquel-metal hidruro, aprovechando la energía regenerativa del frenado del tranvía para recargarlas (García et al., 2013).

A lo largo de las últimas décadas, la investigación relacionada con el abastecimiento energético de tranvías ha mejorado significativamente. Por ejemplo, Li et al. (2019) han presentado un novedoso sistema de control basado en celdas de combustible y supercapacitores para un tranvía, minimizando el consumo de hidrógeno. La mayoría de los estudios existentes se centran en analizar la eficiencia energética, comparando diferentes fuentes energéticas para minimizar el consumo de hidrógeno y estabilizar el voltaje de la barra de corriente continua utilizando diferentes métodos de optimización.

Sin embargo, hasta la fecha, no se ha llevado a cabo un estudio detallado sobre la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables como fuente primaria de abastecimiento

para el sistema de tranvía. Por ejemplo, las estaciones de carga de hidrógeno instaladas a lo largo de la ruta del tranvía podrían utilizar energía de la red eléctrica para llevar a cabo el proceso de electrólisis, en el cual el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad. Además, sería conveniente considerar la implementación de una micro red eléctrica que integre fuentes renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, para generar la electricidad necesaria para este proceso de electrólisis. También podrían explorarse tecnologías emergentes, como supercapacitores, baterías de ion de litio o celdas de combustible de hidrógeno, que actualmente están siendo escasamente estudiadas en este contexto. No obstante, para analizar estos sistemas se requiere un sistema de control que considere varios parámetros y variables, incluyendo la aleatoriedad de las fuentes renovables, el consumo de hidrógeno, la ubicación de los componentes, la gestión energética y el análisis de costes para la topografía andina de la ciudad de Cuenca.

Ante lo expuesto, en este capítulo se analizan alternativas de suministro energético para el tranvía de Cuenca, mediante dos posibles escenarios. El primero, denominado "Tranvía con fuentes renovables", mantiene la estructura actual con catenarias, pero se alimenta de una mini red que aprovecha las potenciales principales fuentes renovables de la ciudad, incluyendo sistemas fotovoltaicos, recursos hidrocinéticos de los ríos locales y fuentes de biomasa provenientes de la industria del mueble, además de la red de suministro energético existente que servirá de apoyo. El segundo escenario, llamado "Tranvía autónomo" se enfoca en utilizar un solo punto de recarga al inicio del trayecto y almacenar la energía a bordo a través de varios sistemas.

Para ambos escenarios propuestos, se han llevado a cabo simulaciones con la herramienta Matlab-Simulink®, que utiliza datos auténticos de corrientes de arranque y parada del tranvía para que los resultados se asemejen a la realidad (Arévalo et al., 2020).

Descripción del tranvía actual y escenarios propuestos

El sistema tranviario de Cuenca en la actualidad sigue un diseño convencional en el que la alimentación eléctrica se realiza principalmente a través de catenarias y, en el Centro Histórico, mediante un sistema de alimentación desde el suelo. Se encuentra una descripción detallada de este tranvía en Arévalo et al. (2020).

A continuación, se explican los dos escenarios de alimentación eléctrica tranviaria propuestos en este capítulo.

Tranvía con fuentes renovables

Fuentes energéticas

En este escenario se propone utilizar una mini red con tres fuentes de energía renovables: un sistema de paneles solares, que aprovechan la elevada radiación solar en la ciudad; turbinas hidrocinéticas de eje horizontal, que aprovechan el potencial hídrico de los ríos de Cuenca para generar electricidad, y una planta de generación eléctrica, que utiliza residuos de biomasa, específicamente aserrín proveniente de varias fábricas de muebles en la ciudad, de los que se dispone de los datos necesarios.

Es importante destacar que la turbina hidrocinética no requiere la construcción de presas ni otros elementos de control. La turbina que se implementaría en el río Paute ha sido objeto de análisis debido a su condición, como la confluencia de varios ríos en él.

Se ha realizado una optimización de la capacidad de las fuentes energéticas de este escenario, basándose en la disponibilidad de recursos renovables durante un año mediante el uso del *software* especializado en optimizaciones de sistemas renovables híbridos HOMER pro (US National Renewable Energy Laboratory [NREL], s.f.).

El tranvía con fuentes renovables utilizará el mismo sistema estructural actual del tranvía de Cuenca, es decir, un es-

cenario incluyendo catenarias para llevar la electricidad desde la fuente de generación hasta el tranvía, y en caso de no existir suficiente recurso renovable, la energía para impulsarlo se tomará desde la red eléctrica de distribución principal, tal como se hace en la actualidad.

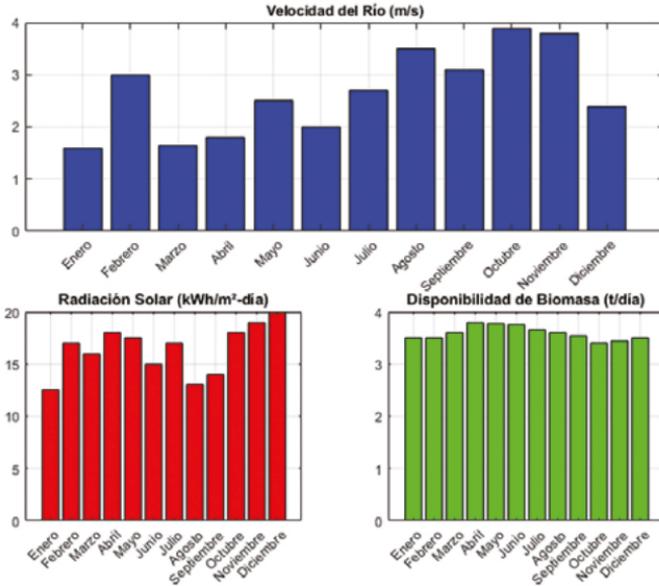


Figura 1. Recursos renovables. (a) Velocidad del Río Paute (m/s), (b) Radiación Solar Global en Cuenca - Ecuador (kWh/m²), (c) Recurso de Biomasa (t/día). Fuente. Arévalo et al. (2020).

La disponibilidad de recursos renovables como la radiación solar, la biomasa y la velocidad del río, se explican en detalle en la Figura 1.

Sistema de almacenamiento energético

El tranvía estará equipado con un sistema de almacenamiento energético híbrido a bordo compuesto por supercapacito-

res y baterías de ion de litio. Se utilizan supercapacitores por su alta densidad de potencia para abastecer al tranvía durante sus arranques y recargar energía durante sus paradas. Asimismo, las baterías de ion-litio, por su bajo coste y alta densidad energética, resultan prometedoras para este tipo de aplicaciones. Esta combinación ayudará a impulsar al tranvía durante los arranques y pendientes, reduciendo el consumo energético de la red eléctrica convencional. Además, cuenta con una celda de combustible que genera electricidad a partir de hidrógeno, la misma que se abastecerá mediante tanques de hidrogeno instalados en ciertas paradas a lo largo del trayecto del tranvía.

Control energético

En esta sección se describe el funcionamiento del tranvía con fuentes renovables, cuyo objetivo principal es reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, aumentar la autosostenibilidad y reducir los altos costos asociados con las facturas eléctricas. Cada componente debe cumplir funciones y restricciones específicas, como se explica a continuación:

- Cuando el supercondensador esté suministrando energía al tranvía, las fuentes renovables recargarán las baterías de iones de litio y los tanques de hidrógeno, ya que es crucial aprovechar al máximo la energía renovable disponible en cada momento.
- Si las baterías de ion de litio están alimentando al tranvía, las fuentes renovables deben recargar los supercapacitores y los tanques de hidrógeno.
- En caso de que las celdas de combustible de hidrógeno estén proporcionando energía al tranvía, las fuentes renovables deben recargar primero el supercondensador y luego las baterías de iones de litio, siguiendo un orden de prioridad.
- Si ningún sistema de almacenamiento energético está suministrando energía al tranvía, las fuentes renovables deben abastecerlo directamente y si todavía hay un exceso de electricidad, esta debe utilizarse para recargar los supercapacitores y las baterías respectivamente. Si aún queda exceso de energía, debe ser inyectado en la red eléctrica pública

- Por último, en caso de que no haya suficiente energía proveniente de las fuentes renovables, como en días nublados o periodos de sequía, el tranvía debe obtener energía de la red de distribución eléctrica convencional para garantizar un suministro continuo.

Tranvía autónomo

Fuentes energéticas

En este escenario, la única fuente de energía es la red eléctrica pública, pero se alimenta en un único punto al final del recorrido del tranvía evitando el uso de los sistemas de transmisión por catenarias o en el suelo. En este caso, no se emplean fuentes de generación de energía renovable.

Sistema de almacenamiento energético

En el punto de recarga, la energía se almacena en baterías de litio, supercondensadores y celdas de combustible de hidrógeno, eliminando la necesidad de un sistema estructural de catenarias. Los puntos de recarga de hidrógeno están distribuidos en algunas estaciones del tranvía, donde se utiliza para recargar los sistemas de almacenamiento energético a través de la celda de combustible de hidrógeno. Para evitar que el tranvía se descargue por completo, antes de llegar a la estación de recarga de hidrógeno, se emplea un sistema de frenado regenerativo que aprovecha la energía cinética acumulada durante las desaceleraciones para recargar los sistemas de almacenamiento energético. Finalmente, al final de su recorrido, los vagones utilizan la energía de la red para recargar nuevamente el sistema antes de iniciar un nuevo trayecto.

Control energético

En este escenario, el enfoque se centra en reducir la infraestructura existente utilizada para suministrar energía al tranvía, en

particular, el sistema de catenarias instalado en la avenida de las Américas y avenida España, además de disminuir significativamente la dependencia de la red eléctrica, de manera similar al caso anterior. Por lo tanto, el tranvía cuenta con un único punto de conexión con la red al final del viaje de ida y vuelta, donde se realiza la recarga de los sistemas de almacenamiento (supercondensadores, baterías y tanque de hidrógeno a bordo). En este caso, la red ya no suministra energía al tranvía a través de catenarias, como ocurría en el caso anterior. Sin embargo, para garantizar el funcionamiento continuo del tranvía, se utiliza el frenado regenerativo, aprovechando la energía cinética de cada vagón cuando estos frenan. A continuación, se detalla el funcionamiento del sistema de control en este escenario:

- Si el supercondensador está suministrando energía al tranvía, la energía generada durante el frenado regenerativo se utiliza para recargar las baterías de ion de litio.
- Cuando las baterías de ion de litio están alimentando al tranvía, el frenado regenerativo se aprovecha para recargar los supercondensadores.
- En caso de que las celdas de combustible de hidrógeno estén abasteciendo al tranvía, la energía obtenida del frenado regenerativo se utiliza primero para recargar el supercondensador y luego las baterías de ion de litio, siguiendo un orden de prioridad.
- Si ninguno de los sistemas de almacenamiento energético está proporcionando energía al tranvía, la red eléctrica pública recargará los tanques de hidrógeno, que deben estar ubicados en ciertas paradas del tranvía.

Cada uno de los dos escenarios propuestos para la propulsión alternativa del tranvía se ha analizado teniendo en cuenta datos reales de corriente durante el frenado y aceleración de cada vagón.

Los detalles de los modelos matemáticos de las fuentes renovables y el sistema de almacenamiento energético, así como la validación experimental de estos modelos, se encuentran exhaustivamente descritos en Arévalo et al. (2020). Es im-

portante destacar que este estudio ha logrado una alta precisión en las simulaciones, reflejando de manera precisa el comportamiento real de cada componente.

Resultados y discusión

Resultados energéticos

Para evaluar los resultados de los escenarios propuestos en este capítulo, se llevaron a cabo detalladas simulaciones computacionales en el *software* Matlab (MathWorks, s.f.) , donde se modeló el tranvía de Cuenca. A continuación, se presentan los resultados de cada componente con relación a los dos escenarios presentados.

En la Figura 2, se muestra la potencia generada por los supercapacitores. El tranvía con fuentes renovables se representa como "1" y el tranvía autónomo como "2". En el eje horizontal, se representa el tiempo en segundos. Este intervalo es crucial, ya que el tranvía experimenta picos de potencia durante el arranque y la parada. Es evidente que el supercapacitor del tranvía con fuentes renovables puede cubrir picos de potencia más altos. En este caso, el supercapacitor se descarga hasta un

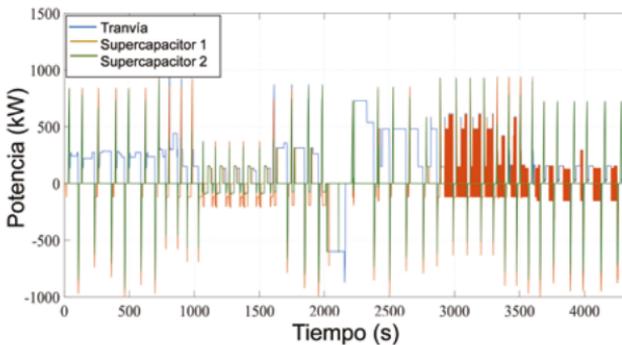


Figura 2. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por el supercapacitor. Fuente. Arévalo et al. (2020).

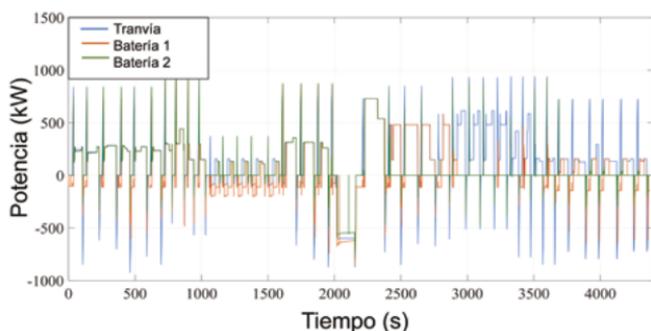


Figura 3. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por las baterías. Fuente: Arévalo et al. (2020).

90,55 % para el tranvía con fuentes renovables y un 89,69 % para el tranvía autónomo, en promedio. El objetivo del control energético propuesto es mantener el supercapacitor con una alta carga para garantizar el suministro. Sin embargo, es importante destacar que el supercapacitor solo puede cubrir picos de potencia instantáneos. Para situaciones en las que el supercapacitor no es suficiente, se utilizan baterías de iones de litio, como se explica a continuación.

En la Figura 3, se muestra la potencia generada por las baterías en relación con la potencia eléctrica total consumida por el tranvía durante todo su recorrido. Nuevamente, se utiliza "batería 1" para el tranvía con fuentes renovables y "batería 2" para el tranvía autónomo. En este caso, las baterías suministran energía durante más tiempo en comparación con los supercapacitores. Es importante destacar que el tranvía con fuentes renovables es capaz de cubrir picos de potencia eléctrica más altos. La descarga promedio de las baterías es del 72,42 % para el tranvía con fuentes renovables y del 69,92 % para el tranvía autónomo.

A pesar de tener un sistema híbrido (supercapacitores y baterías) para impulsar el tranvía, existen tramos, como la subida de Milchichig, que presentan pendientes pronunciadas, así como múltiples paradas no planificadas a lo largo de todo

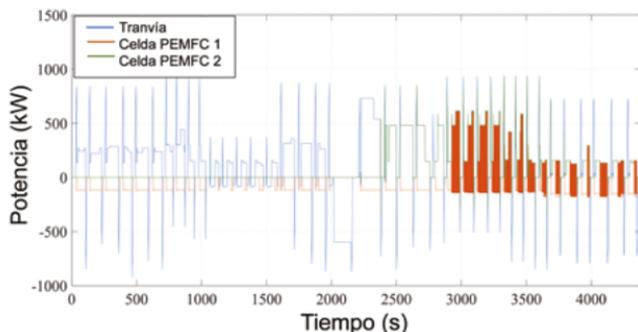


Figura 4. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por las celdas de combustible de hidrógeno. Fuente. Arévalo et al. (2020).

el trayecto. Para garantizar la continuidad del servicio en todo momento, se incorpora un sistema de celdas de combustible de hidrógeno.

La Figura 4, muestra la potencia de salida de las celdas de combustible de hidrógeno. A diferencia de los dos componentes anteriores, las celdas solo producen la potencia que los supercapacitores y las baterías no pueden suministrar. “Celda 1” corresponde al tranvía con fuentes renovables, que tiene una mayor capacidad de suministro, y “Celda 2” corresponde al tranvía autónomo, que tiene una menor capacidad. En cuanto al nivel medio de carga del tanque de hidrógeno, es del 28,02 % para el tranvía con fuentes renovables y del 32,29 % para el tranvía autónomo. El consumo de hidrógeno aumenta cuando no se consideran fuentes renovables.

En resumen, los resultados indican que ambos escenarios pueden abastecer al tranvía durante todo su recorrido sin depender directamente de la red eléctrica principal. Sin embargo, el tranvía autónomo debe recargar sus componentes de almacenamiento energético desde la red eléctrica al final de su viaje. Con tecnología avanzada, la recarga de tranvías autónomos puede ser muy rápida gracias a sistemas de carga de alta

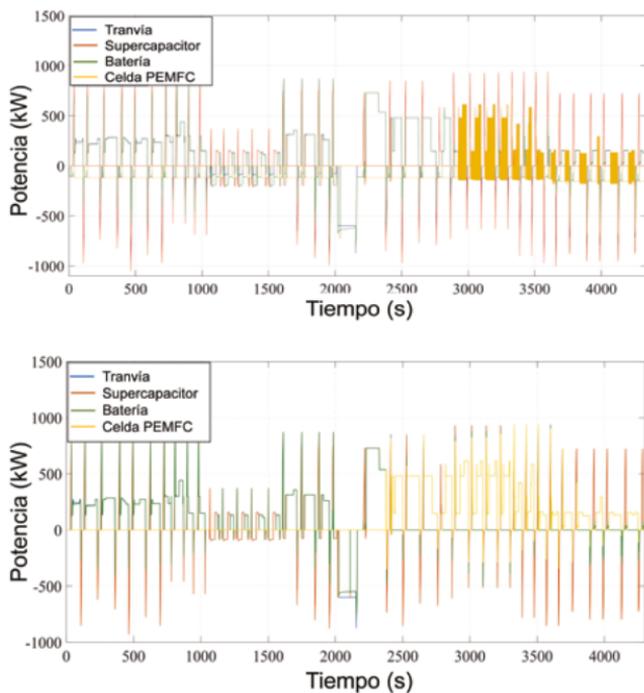


Figura 5. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por el sistema de almacenamiento. (a) Tranvía con fuentes renovables y (b) Tranvía autónomo. Fuente. Arévalo et al. (2020).

potencia, carga por inducción, baterías diseñadas para cargas rápidas y sistemas avanzados de gestión de baterías. Algunas estaciones de carga pueden recargar los tranvías en minutos o incluso segundos, en paradas estratégicas; aunque la implementación de estas tecnologías puede ser costosa y requerir una infraestructura especializada. El resultado de este escenario energético para impulsar el tranvía de Cuenca durante todo su recorrido se muestra en la Figura 5.

Tabla 1. Principales costes de los elementos de abastecimiento energético para el tranvía de Cuenca.

Componente	Inversión US \$	Costo de reemplazo	Operación y mante- nimiento	Expec- tativa de vida
Turbina hidrocínética	\$11 179	\$9 500	\$20 000	10 años
Paneles solares	\$62 000	\$45 000	\$12 400	25 años
Supercapacitor	\$75 840	\$56 880	0	30 años
Batería	\$16 447	\$6 660	\$5 369	12 años
Celda de hidrógeno	\$90 000	\$90 000	0	40 000 h
Tanque de hidrógeno	\$50 000	\$37 500	0	25 años

Resultados económicos

Es relevante destacar que en este análisis económico se han considerado únicamente los costos de inversión, reemplazo, operación y mantenimiento de los componentes del sistema de abastecimiento energético del tranvía durante un período de 20 años, tal como se detalla en la Tabla 1. No se han incluido los costos relacionados con la instalación, conexión a la red, transmisión u otros costos de infraestructura, ya que estos podrían variar significativamente según el contexto y el alcance del proyecto. La omisión de estos costos adicionales se debe considerar como una limitación en este análisis económico (Arévalo et al., 2020).

En cuanto a los costos de inversión y operación de los nuevos elementos para impulsar el tranvía, también se han considerado los costos de compra de electricidad desde la red. Actualmente, el costo en Cuenca es de 9 centavos por kilovatio hora de energía (Arévalo et al., 2020), y este costo debe ser

cubierto por el consumo eléctrico de cada vagón tranviario. En caso de que las fuentes renovables produzcan un exceso de energía, esta puede venderse a la red eléctrica pública, lo que reduce aún más los costos energéticos. Según la normativa ecuatoriana, se consideran costos de 6 centavos por kilovatio hora relacionados con paneles solares y pequeñas hidroeléctricas (Arévalo et al., 2020).

En resumen, el tranvía con fuentes renovables tiene un costo total neto de 1,5 millones de dólares, que incluye el costo de inversión de sus componentes detallados en la Tabla 1 y las ganancias por la venta de electricidad a la red eléctrica pública. Este valor refleja la reducción de la dependencia de la red eléctrica pública.

El tranvía autónomo tiene un costo total neto de 1,7 millones de dólares, lo que lo convierte en un sistema más costoso que el anterior debido a que no cuenta con fuentes renovables y debe comprar más electricidad a la red eléctrica pública.

Para comparar, el costo de la energía comprada desde la red para abastecer al tranvía de Cuenca actual, sin considerar ningún sistema nuevo, es de aproximadamente 1,9 millones de dólares, sin incluir costos de mantenimiento.

Conclusiones

En este capítulo, se ha presentado un análisis de dos innovadores escenarios alternativos para impulsar el tranvía de Cuenca, Ecuador. El primer escenario, denominado “tranvía con fuentes renovables”, incorpora una mini red de energías renovables y sistemas a bordo que incluyen supercapacitores, baterías de litio y celdas de hidrógeno. El segundo escenario, denominado “tranvía autónomo”, requiere un único punto de carga al final del viaje de ida y vuelta y cuenta con sistemas a bordo similares a los del primer escenario, pero no depende de un sistema de catenarias para el suministro de energía.

Comparando el consumo de hidrógeno, se observa que el tranvía con fuentes renovables consume un 4,27 % menos de

hidrógeno en comparación con el tranvía autónomo. Además, los sistemas de propulsión del tranvía con fuentes renovables han demostrado una mayor capacidad para suministrar energía al tranvía en comparación con el tranvía autónomo. Sin embargo, el tranvía con fuentes renovables aún utiliza un sistema de catenarias en ciertos trayectos.

Desde una perspectiva económica, al comparar ambos escenarios durante un ciclo de operación de 20 años, el primero ahorra \$422 454,60 en comparación con el segundo escenario. Ambos escenarios ofrecen un ahorro de al menos \$300 000 con respecto al consumo energético actual en el tranvía de Cuenca. Es necesario recordar que en este análisis no se han incluido otros costos importantes para la implementación del sistema, incluyendo las obras civiles o los sistemas de transmisión energética y conexión a la red actual.

Este estudio ha demostrado que el tranvía de Cuenca puede ser impulsado utilizando fuentes de energía renovable, que incluyen el hidrógeno como una opción prometedora, sin depender de sistemas complejos de catenarias o subestaciones para la alimentación eléctrica, como ocurre en el Centro Histórico de Cuenca. Esto representa un cambio significativo en el costo y la complejidad del proyecto. Aunque el tranvía actual funciona correctamente, este estudio podría servir de base para futuras expansiones del sistema de tranvía hacia diferentes áreas de la ciudad, proporcionando un transporte limpio y seguro.

En resumen, la movilidad eléctrica a gran escala en Cuenca es una necesidad urgente. Al ser una ciudad de tamaño mediano, es crucial una planificación urbana sostenible que aborde la creciente demanda de transporte público de manera amigable con el medio ambiente y económicamente viable para los ciudadanos.

Es importante mencionar que este estudio tiene algunas limitaciones, como la omisión de los costos relacionados con la instalación, conexión a la red, transmisión y otros costos de infraestructura, lo que podría afectar significativamente los resultados económicos. Además, aunque se proponen escenarios de suministro energético alternativos, no se profundiza en la viabilidad técnica y económica de implementar estos sistemas

en la práctica ni en los posibles desafíos logísticos que podrían surgir. El tranvía autónomo depende en gran medida de la recarga energética al final de su recorrido o en puntos estratégicos, lo que podría plantear cuestiones sobre la infraestructura de carga, la velocidad de recarga y la disponibilidad de recursos energéticos. Estos aspectos deben considerarse en futuros desarrollos y expansiones del sistema de tranvía de Cuenca.

Referencias

Arévalo, P., Cano, A., Benavides, J., y Jurado, F. (2021). Feasibility study of a renewable system (PV/HKT/GB) for hybrid tramway based on fuel cell and super capacitor. *IET Renewable Power Generation*, 15(3), 491–503. <https://doi.org/10.1049/RPG2.12056>

Arévalo, P., Cano, A., y Jurado, F. (2020). Comparative study of two new energy control systems based on PEMFC for a hybrid tramway in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25357–25377. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.06.212>

García, P., Fernández, L. M., Torreglosa, J. P., y Jurado, F. (2013). Comparative study of four control systems for a 400-kW fuel cell battery-powered tramway with two dc/dc converters. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 23(7), 1028–1048. <https://doi.org/10.1002/ETEP.1636>

García, P., Torreglosa, J. P., Fernández, L. M., y Jurado, F. (2012). Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(11), 9368–9382. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.02.184>

Li, Q., Su, B., Pu, Y., Han, Y., Wang, T., Yin, L., y Chen, W. (2019). A state machine control based on equivalent consumption

tion minimization for fuel cell/ supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(2), 552–564. <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2915689>

MathWorks. (s.f.). *MATLAB and Simulink® version 9.10.0 (R2021a)* (9.10.0 (R2021a)) [Software]. Recuperado el 29 de agosto de 2023, de <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

US National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s.f.). *HOMER Pro®—Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrid* (3.16.2) [Software]. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>



Características y efectos de la movilidad motorizada en la ciudad de Cuenca

Néstor Rivera:  0000-0003-4231-2267

Juan Molina:  0000-0002-6036-1452

Andrea Bermeo:  0000-0001-6895-0668

Gina Novillo:  0009-0008-2352-2895

1 Universidad Politécnica Salesiana

2 Unidad Educativa Técnico Salesiano.

Puntos clave

- El Tranvía de Cuenca presenta muy buenos índices de confort en su recorrido.
- El modo de conducción de un vehículo con motor de combustión interna determina su consumo de combustible.
- Cuenca presenta condiciones especiales de operación para los vehículos, por lo que las emisiones contaminantes generadas son diferentes a las estimadas por metodologías internacionales.
- Durante la pandemia, la calidad del aire mejoró significativamente en Cuenca.

111

Introducción

Este capítulo explora algunos de los efectos de la movilidad motorizada en Cuenca. A medida que la urbe experimenta un crecimiento acelerado y un aumento en la posesión de vehículos particulares, es crucial comprender el impacto que estos tienen en el entorno urbano y en la calidad de vida de sus habitantes.

La propuesta considerada para mejorar la movilidad de los residentes de Cuenca es la implementación del Tranvía, un sistema de transporte público que se destaca por su modernidad y eficiencia en términos de sostenibilidad energética. Por lo tanto, resulta de suma importancia evaluar el nivel de servicio que este sistema ofrece a sus usuarios a través del análisis del confort mediante el método de Sperling y se rige por la norma UNE EN 12299, que establece los parámetros para medir el nivel de comodidad de los pasajeros. Estos parámetros se determinan a partir de los resultados obtenidos mediante la captura y análisis de las señales de aceleración registradas dentro del vehículo durante su trayecto.

A continuación, se evalúa el preocupante tema de la contaminación que generan los vehículos particulares. El incremento constante de automóviles ha resultado en una mayor emisión de gases y partículas nocivas, afectando la calidad del aire y la salud de la población. A través de estudios parciales se analiza la magnitud de este problema y su impacto en el entorno urbano de Cuenca, centrados en el estilo de conducción y las características de los sistemas componentes de los motores de combustión interna que circulan en la ciudad.

De forma final se aborda un aspecto inesperado: la pandemia de COVID-19 y su efecto en la movilidad motorizada y la calidad del aire de la ciudad. Durante el confinamiento y las restricciones de movimiento, la disminución significativa del tráfico vehicular proporcionó una oportunidad única para evaluar los cambios en los niveles de contaminación y su correlación con la movilidad reducida. A través de datos recopilados durante este período, se examina cómo la pandemia ha afectado la calidad del aire y la percepción general de los ciudadanos sobre la importancia de una movilidad más sostenible.

De forma conjunta, este capítulo nos proporciona una visión clara y detallada de los desafíos y oportunidades que enfrenta Cuenca con relación a la movilidad motorizada. Al comprender la magnitud de la contaminación generada por los vehículos particulares, los cambios durante la pandemia y los beneficios del tranvía en términos de confort y sostenibilidad, se podrán desarrollar estrategias que fomenten una movilidad más

amigable con el medio ambiente y una calidad de vida mejorada para todos los habitantes.

Análisis de confort del tranvía de Cuenca

El estudio presenta la estimación del índice de comodidad del Tranvía de Cuenca, en donde se concluye que es muy cómodo y las vibraciones producidas son ligeramente percibidas por los usuarios (Novillo et al., 2022). Se consideran tres índices de evaluación: comodidad media (NMV), índice de comodidad continua (CCX, CCY, CCZ) y comodidad completa (NVA), que se calcularon a partir de mediciones de aceleración en los tres ejes, obtenidas de tres equipos de registro ubicados en la parte delantera, central y posterior del tranvía según determina UNE EN 12299. Se aplica el método Sperling en las rutas río Tarqui-Parque Industrial (Itinerario 1) y Parque Industrial-río Tarqui (Itinerario 2), que genera índices de confort en función de las aceleraciones medidas, considerando la densidad espectral de potencia de la señal en cada una de las tres direcciones. La comodidad según el método de Sperling se refleja en la Tabla 1, de acuerdo con la escala de índices de comodidad (W_{zx} , W_{zy} , W_{zz}), las vibraciones producidas son "ligeramente perceptibles" por los usuarios del tranvía.

113

Tabla 1. Índice de comodidad según Sperling.

Ruta / Punto medición	W_{zx}	W_{zy}	W_{zz}
Itinerario 1 / Medio	1,01884	1,01884	0,8200
Itinerario 2 / Medio	1,01793	1,01793	0,8147
Itinerario 1 / Atrás	1,01658	1,01658	0,8155
Itinerario 2 / Atrás	0,91862	0,91862	0,7600
Itinerario 1 / Adelante	0,93470	0,93470	0,7610
Itinerario 2 / Adelante	0,94300	0,94300	0,7710

La calidad de la marcha de acuerdo con el método de Sperling se evalúa en la Tabla 2, definiendo a la conducción como "Muy buena".

Tabla 2. Calidad de conducción según Sperling (Wz).

Ruta / Punto medición	Wzx	Wzy	Wzz
Ida / Medio	0,4000	0,4000	0,4000
Regreso / Medio	0,4117	0,4117	0,4117
Ida / Atrás	0,4132	0,4132	0,4132
Regreso / Atrás	0,4500	0,4500	0,4500
Ida / Adelante	0,4517	0,4517	0,4517
Regreso / Adelante	0,9430	0,9430	0,7710

En la tabla 3 se observa que todos los valores de NMV X, NMV Y y NMV Z son menores a uno, por lo tanto, según el índice de comodidad es "Muy Cómodo".

Tabla 3. Índice de comodidad NMV de acuerdo a EN 12299.

Ruta	Punto medición	N _{MVX}	N _{MVY}	N _{MVZ}	N _{MV}
Ida	Adelante	0,7449	0,4915	0,9708	1,3187
Vuelta	Adelante	0,6351	0,5595	0,7635	1,1399
Ida	Medio	0,6205	0,5161	0,5229	0,9617
Vuelta	Medio	0,4874	0,6148	0,5478	0,9569
Ida	Atras	0,6268	0,6907	0,5775	1,0970
Vuelta	Atras	0,6615	0,6047	0,5210	1,0367

El confort del tranvía de Cuenca ha sido evaluado por diferentes métodos y directrices aplicando método de Sperling y la Norma UNE EN 12299, dando como resultado que es un medio de transporte cómodo y las vibraciones son ligeramente percibidas por el usuario.

Influencia del modo de conducción en el consumo de combustible

En las investigaciones presentadas en Molina Campoverde (2020), Bermeo Naula, Molina Campoverde, y Campoverde (2023) proponemos un modelo de estimación de los modos de conducción basado en el análisis de las señales de los parámetros de identificación (PID's) obtenidas a través de diagnóstico a bordo (OBD II) de un vehículo, cuyo motor de combustión interna a gasolina tiene una cilindrada de 1 500 cc, y consta como el Sedan más vendido en Cuenca, en el período 2005-2015. La investigación se basa en dos etapas: la primera, se da en laboratorio y consta de cuatro pruebas de potencia realizadas en un banco dinamométrico en donde la mariposa de aceleración gobernada por el pedal del acelerador se sitúa a una apertura del 25 %, 50 %, 75 % y 100 % para establecer la relación del rendimiento del motor con respecto al consumo de combustible. La segunda etapa se realiza mediante una prueba de carretera en donde se monitorea el vehículo en condiciones reales de conducción y se recolectan datos de los sensores de velocidad (VSS), posición del acelerador (TPS), carga del motor (MAP) y temperatura del refrigerante (ECT).

Con estos datos se genera un modelo para explicar la relación entre las prestaciones del motor y la circulación de un vehículo en condiciones normales, para cada marcha seleccionada por el conductor. Una vez identificada cada una de las marchas se relaciona el consumo específico de combustible con respecto a la potencia entregada por el motor, obteniendo así los valores ideales para una conducción eficiente que es el método de conducción con el que se consiguen los menores valores de consumo de combustible y de emisión de contaminantes. Así mismo analizamos la aceleración entregada por cada una de las marchas obtenidas dado que estas dependen directamente de la relación de transmisión obtenido del cambio de marcha y el régimen de giro del motor. A partir del modelo, obtuvimos los valores para una conducción ecológica en donde se indica la selección de marchas eficaces en función al régimen máximo y

mínimo del giro del motor (RPM) y las aceleraciones producidas para establecer un consumo bajo de combustible (Tabla 4).

Tabla 4. Valores para una conducción ecológica.

Cambio de marcha	Velocidad (km/h)	RPM max.	RPM min.	Aceleración máxima (m/s ²)	Aceleración mínima (m/s ²)
1-2	26,03	3400	1900	6,908	4,205
2-3	42,47	3100	2000	4,501	2,767
3-4	61,48	2900	2100	2,860	1,990
4-5	86,71	2900	2000	2,033	1,380

Finalmente, el modelo es capaz de determinar el modo de conducción entre Sport, Normal y Ecológica con la finalidad de proporcionar sugerencias que permitan mejorar los hábitos de manejo en la conducción con la intención de reducir el consumo de combustible y de emisiones contaminantes, como la conducción evitando alcanzar valores superiores a las 3 100 RPM de régimen de giro del motor, evitar accionar al 100 % el pedal del acelerador y evitar aceleraciones y desaceleraciones fuertes.

Optimización de motores ciclo Otto para la ciudad de Cuenca

Cuenca cuenta con un parque automotor de alrededor de 115 000 vehículos, de los cuales el 67 % utiliza gasolina. Debido a la situación geográfica de la urbe cuencana, que se encuentra a 2 550 msnm, la potencia de los motores de los vehículos disminuye (Rivera-Campoverde, Chica y Zambrano, 2017), lo que conlleva a un aumento del consumo de combustible y de la emisión de gases contaminantes. A pesar de que los motores vienen acondicionados para operar a esta altitud, es importante resaltar que estos han sido diseñados bajo consideraciones am-

bientales normalizadas que contemplan al nivel del mar como referencia (Rivera et al. 2017).

En este contexto, hemos estudiado el comportamiento de un motor ciclo Otto con gestión electrónica de combustible, y subsistemas que permiten al vehículo contar con la designación Euro 4, respecto de la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido utilizando un diseño experimental de superficie de respuesta Box-Behnken para Cuenca (Rivera-Campoverde et al., 2017). Con esto fue posible determinar el grado de influencia que tienen la gasolina extra y súper, así como la zona de mejor desempeño para las condiciones ambientales particulares de Cuenca, lo que permite optimizar el consumo de combustible.

Los dos tipos de combustible que se comercializan en la ciudad permiten trabajar con mezclas ligeramente pobres a bajas velocidades con niveles de carga externa baja; la mezcla debe enriquecerse cuando el motor se acelera y la carga aumenta. La gasolina súper puede trabajar en altas condiciones de carga y régimen de giro con mezcla ligeramente rica y un adelanto al encendido superior al preestablecido por el fabricante, contrario a lo que ocurre con la gasolina extra que no puede trabajar con adelantos superiores a los ya establecidos, debido a la pérdida de potencia e incremento del consumo de combustible y la emisión de hidrocarburos no combustionados.

Optimizando la dosificación de la relación aire/combustible y la puesta a punto del adelanto al encendido para el uso de gasolina súper se consiguió incrementar la potencia del motor hasta un 1,59 % disminuyendo las emisiones de hidrocarburos no combustionados en 8 %, óxidos nitrosos en 5,87 % y el consumo específico en un 1,05 %, con un incremento de 23,33 % de monóxido de carbono que dista del límite impuesto por la normativa local. En el caso de la gasolina extra los resultados muestran que se puede aproximar mucho el funcionamiento del motor al que se produce con gasolina súper en condiciones normales de operación. De la optimización se obtiene una disminución de tan solo el 0,14 % de potencia, frente a una reducción del 15 % de monóxido de carbono, 31,93 % de óxidos nitrosos y un incremento del 76 % de hidrocarburos no combustionados como se muestra en la Figura 1.

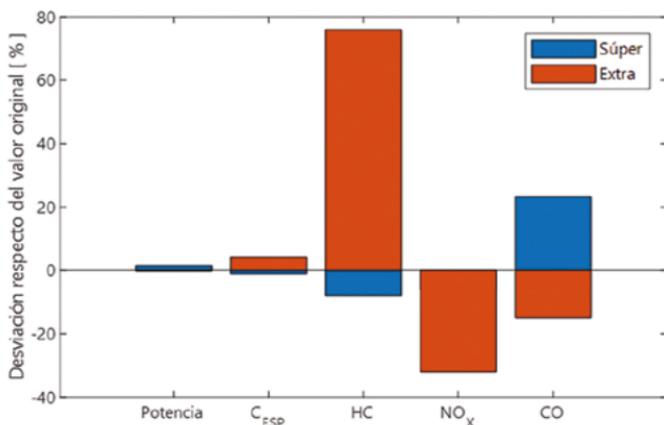


Figura 1. Prestaciones y Emisiones obtenidas de la optimización del motor.

Fruto del proceso de optimización se determina que no se pueden mejorar las prestaciones del motor sin alterar las emisiones contaminantes y viceversa. Pese a que los fabricantes recomiendan utilizar combustible de alto octanaje, dadas las condiciones de la ciudad de Cuenca es posible utilizar combustible de bajo octanaje en este tipo de motores, con las respectivas correcciones en la unidad de control electrónico.

Estimación de factores de emisión de fuentes móviles para Cuenca

Los inventarios de emisiones contaminantes se constituyen como importantes herramientas para establecer lineamientos y políticas para mejorar la calidad del aire en las ciudades. La veracidad de los inventarios depende directamente de los insumos que se utilizan para calcular los contaminantes emitidos a la atmósfera, en este marco la Empresa de Movilidad de Cuenca [EMOV EP], plantea el uso de la directriz COPERT de origen europeo para el cálculo de la contaminación generado por el par-

que automotor, cuyos factores de emisión se definen mediante el modelo Internacional de Emisiones vehiculares "IVE", lo que genera sesgo en el cálculo debido a que la base de datos contiene información del parque automotor, combustibles y tecnología vehicular de Estados Unidos, muy diferentes a la realidad de Cuenca.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para estimar las emisiones contaminantes en condiciones reales de conducción aplicando aprendizaje automático a datos obtenidos de la plataforma OBD (*On Board Diagnostic*) (Rivera-Campoverde, Muñoz-Sanz y Arenas-Ramírez, 2021). Para ello, recolectamos datos de conducción y emisiones a través de un equipo de adquisición de datos y un sistema portátil de medición de emisiones en una ruta normalizada. La ruta y la distinción entre los segmentos urbano, rural y autopista se determina por las condiciones de conducción mediante la directriz Euro 6 (European Commission and Council of the European Union, 2016), misma que se compone de tres segmentos que son urbano, rural y autopista en proporción del 34 %, 33 % y 33 % respectivamente. Los datos obtenidos en esta ruta de 64 km se utilizaron para entrenar un modelo basado en aprendizaje automático para la predicción de las emisiones contaminantes generadas por el vehículo. El modelo desarrollado es alimentado por un conjunto de datos obtenidos durante 1 218,9 km de recorrido en tres meses de conducción completamente aleatoria.

Según el análisis de los datos obtenidos, las paradas del vehículo constituyeron el 14,26 % del tiempo total de circulación, por lo que las emisiones generadas en esta condición de funcionamiento corresponden al 7,35 % de CO₂, 1,51 % de CO, 1,85 % de HC y 0,38 % de NO_x respecto del total de emisiones generadas durante todo el recorrido analizado. En la circulación urbana las velocidades medias son bajas ocasionando el uso mayoritario de la 1ª, 2ª y 3ª marchas con el consecuente incremento de emisiones contaminantes.

Los resultados obtenidos indican que el modelo propuesto es más robusto a diferentes condiciones de tráfico y presenta mejores resultados a bajas velocidades medias de circulación al ser comparado con los resultados obtenidos aplicando

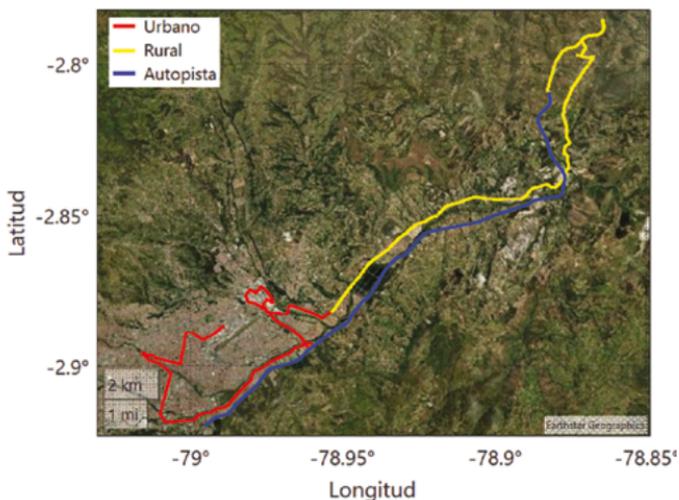


Figura 2. Ruta de pruebas para la obtención de factores de emisión de CO_2 , CO , HC , y NO_x .

los modelos IVE y COPERT. Esto se debe a su entrenamiento y validación con una gran cantidad de datos, 88 657 y 78 526 muestras respectivamente, y a su aplicación en 1114 346 muestras, obtenido en condiciones completamente aleatorias de conducción.

En este punto el modelo planteado es más robusto a diferentes condiciones de tráfico y estilos de manejo en la zona urbana, ya que se basa en los resultados de conducción aleatoria de 1 218,9 km, frente a los 62,49 km del RDE test y los resultados del modelo IVE. Los resultados obtenidos muestran gran similitud entre el modelo planteado y el método propuesto en la norma Euro 6 develando el sesgo que presenta el modelo IVE en la estimación de contaminantes en las condiciones de circulación de Cuenca.

Por lo tanto, se concluye que el modelo generado puede ser utilizado en la estimación de factores de emisión y en la homologación vehicular, así como en la estimación de inventarios de emisiones vehiculares, sin necesidad de tener instrumentado el vehículo por largos recorridos de pruebas.

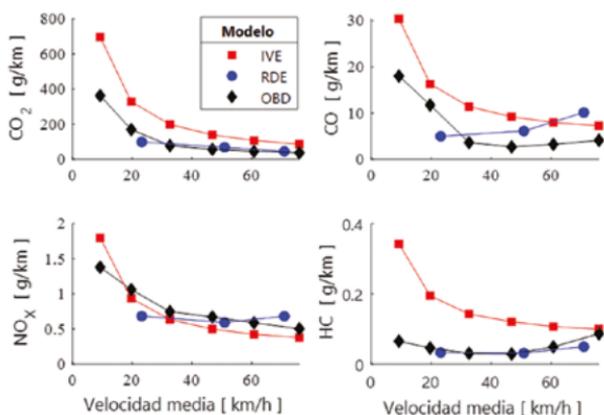


Figura 3. Factores de emisión obtenidos en Cuenca mediante tres modelos.

Estudio de la calidad del aire en el Centro Histórico de Cuenca como consecuencia de los cambios a la movilidad causada por el COVID-19

El brote del COVID-19 en el mundo ha causado una disminución significativa en la movilidad de las personas debido a las medidas de confinamiento y restricciones de transporte. Esto ha provocado cambios en la calidad del aire en muchas ciudades alrededor del mundo. En el estudio publicado en Rivera Cam-poverde et al. (2022) buscamos analizar el impacto en la calidad del aire de los cambios en la movilidad en el Centro Histórico de Cuenca.

Para esto se recolectan datos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en esta zona, antes y durante el confinamiento debido a la pandemia del COVID-19. Se registran datos en tiempo real de las variables independientes como el dióxido de

nitrógeno (NO₂), partículas en suspensión (PM_{2,5}), ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO), se tiene además las variables de ruido como velocidad del viento (VV), radiación solar (RS), humedad relativa (HR), presión atmosférica (PA), temperatura del aire (TA) y finalmente, se utilizan modelos explicativos basados en aprendizaje automático para la predicción de la variable dependiente que en este caso es la tasa de contagio.

Los resultados del estudio mostraron una disminución significativa en los niveles de contaminantes atmosféricos en el Centro Histórico de Cuenca durante el periodo de confinamiento. Como se muestra en la Tabla 5, la concentración promedio de CO, NO₂, SO₂ y PM_{2,5} disminuyó en un 51, 43, 45 y 41 % respectivamente, no obstante, durante ese mismo periodo se registra un aumento en los niveles de O₃. Esto se debe a la influencia predominante de la radiación solar, que aumenta su impacto en la presencia de menos contaminantes en el aire, facilitando la formación de ozono.

Los resultados sugieren que los cambios en la movilidad causados por la pandemia del COVID-19 han tenido un impacto positivo en la calidad del aire en el Centro Histórico de Cuenca. Sin embargo, es importante señalar que estos cambios fueron

Tabla 5. Reducción de contaminantes

Contaminante	Unidad	Año 2018	Año 2019	Reducción %
CO	mg/m ³	1,32	0,64	51
NO ₂	µg/m ³	48,30	27,50	43
SO ₂	µg/m ³	38,70	21,20	45
PM _{2,5}	µg/m ³	19,10	11,30	41

temporales y se espera que los niveles de contaminación atmosférica hayan aumentado nuevamente luego de levantadas las medidas de confinamiento y la movilidad se haya recuperado a los niveles anteriores a la pandemia. Es necesario que las autoridades tomen medidas para fomentar una movilidad más sostenible y reducir los niveles de contaminación del aire

en la ciudad. El estudio también sugiere la necesidad de realizar investigaciones adicionales para evaluar el impacto de la movilidad en otros sectores de la ciudad y desarrollar políticas y medidas efectivas para mejorar la calidad del aire.

Conclusiones

La implementación de un sistema de transporte moderno y ecológico como el Tranvía de Cuenca genera beneficios tanto a los usuarios como al ambiente. El moderno medio de transporte brinda a sus usuarios condiciones adecuadas de confort según lo evaluado con la normativa aplicable. A partir de la estimación del nivel de confort se ve necesario e imperativo evaluar el nivel de seguridad del mismo en futuros trabajos, que brinden la adecuada información para la marcha correcta del sistema.

La ciudad de Cuenca presenta condiciones especiales para la circulación de vehículos con motores a gasolina, por lo que disponer modelos analíticos concebidos específicos para sus características particulares mejora la estimación de contaminantes disminuyendo la incertidumbre del inventario de emisiones vehiculares, lo que se convierte en un importante insumo a la hora de establecer lineamientos y políticas para mejorar la calidad del aire de la ciudad.

Estas condiciones especiales de circulación hacen que los motores trabajen de diferente manera para la que fueron concebidos, por ello la importancia de optimizar el funcionamiento del motor para las condiciones operativas de nuestra ciudad, con lo que se consigue disminuir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes generadas, considerando los combustibles disponibles en nuestro medio.

La pandemia de COVID-19 ha tenido un gran impacto en la movilidad, cambiando los patrones de viaje y la forma de movilizarse de las personas. Si bien existen beneficios ambientales y una creciente conciencia de la necesidad de una movilidad más sostenible, también hay muchos desafíos que deben abordarse para garantizar una movilidad eficiente, segura y asequi-

ble. Este estudio proporciona una base sólida para comprender estos cambios y guiar las futuras estrategias de movilidad.

Referencias

Bermeo Naula, A., Molina Campoverde P., y Rivera Campoverde, N. (2023). "Methodological Proposal for Estimating Polluting Emissions: Case of Cuenca, Ecuador." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1141(1), 012003. doi: 10.1088/1755-1315/1141/1/012003.

European Commission and Council of the European Union. (2016). "Commission Regulation (EU) 2016/427 of 10 March 2016 Amending Regulation (EC) No 692/2008 as Regards Emissions from Light Passenger and Commercial Vehicles (Euro 6) (Text with EEA Relevance)". *Official Journal of the European Union*, 82, 1–98.

Molina Campoverde, J. (2020). Driving Mode Estimation Model Based in Machine Learning Through PID's Signals Analysis Obtained From OBD II. *Communications in Computer and Information Science*, 1194, 80–91.

Novillo, G., Rivera, N., Soto-Ocampo, C. y Mera, J. (2022). Analysis of tram comfort using the UNE EN 1299:2012 standard an sperling metod (WZ). *WIT Transactions on the Built Environment*, 213, 3–13. WITPress.

Rivera-Campoverde, N., Muñoz-Sanz, J. y Arenas-Ramirez, B. (2021). Estimation of Pollutant Emissions in Real Driving Conditions Based on Data from OBD and Machine Learning. *Sensors*, 21(19). Doi: 10.3390/S21196344.

Rivera, N., Chica, F., Zambrano, I. y García, C. (2017). Study Of The Behavior Of An Otto Engine Of Electronic Injection In Relation To The Stoichiometry Of The Mixture And The Advance To The Ignition For Cuenca City. *Revista Politécnica*, 40.

Transporte, energía y transición a la electromovilidad

Xavier Serrano-Guerrero:  0000-0001-6446-3600

Antonio Barragán-Escandón:  0000-0003-2254-2524

Esteban Zalamea-León:  0000-0001-5551-5026

1 Grupo de Investigación en Transición Energética,
Universidad Politécnica Salesiana
2 Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca

Puntos clave

- El sector de transporte es el mayor consumidor de energía en Cuenca.
- El potencial de energía solar fotovoltaica de Cuenca permitiría cubrir más de tres veces su consumo eléctrico actual.
- Los autobuses convencionales de varias rutas de transporte público tienen potencial para ser reemplazados por autobuses eléctricos.
- Los excedentes de la producción fotovoltaica pueden ser aprovechados para producir hidrógeno verde a ser utilizado en el transporte público.
- La electrificación del sector transporte es factible y presenta varios beneficios ambientales y económicos.

Introducción

En este capítulo abordamos el sector del transporte en Cuenca desde el punto de vista energético, así como sus implicaciones e impacto en el medio ambiente de la ciudad a partir de los resultados de investigaciones que se han desarrollado recientemente. Estos estudios incluyen: la definición de la incidencia actual

del transporte en la matriz energética local, el análisis de propuestas metodológicas para la migración de autobuses con motores de combustión interna hacia autobuses eléctricos (ABEs) a través de procesos sistemáticos de priorización, y el estudio del potencial del uso del hidrógeno en la energización de autobuses a partir de la integración masiva de sistemas fotovoltaicos (FV) en la zona urbana de Cuenca.

Con los resultados de estos estudios se proponen pautas para mejorar la calidad de vida de los residentes de la ciudad, a través de la reducción de emisiones de gases contaminantes, el aprovechamiento de potencial solar urbano desde el transporte y el uso óptimo de la energía. Los resultados de las investigaciones han sido publicados en revistas científicas de alto impacto y son, sin duda, un insumo importante para los tomadores de decisión en las áreas de transporte y energía de la ciudad. Se requiere de decisión política para que la información disponible se considere en la planificación a mediano y largo plazo, sobre todo al incorporar nuevas tecnologías.

La energía en el sector del transporte en Cuenca

La zona urbana de Cuenca en 2015 consumió una cantidad de energía aproximada de 2 717 kBEP (equivalente a miles de barriles). Los requerimientos energéticos urbanos que demanda la ciudad se representan en la Figura 1, donde se observa la alta dependencia de recursos fósiles que tiene la ciudad (alrededor del 90 %). No obstante, esto no es una situación particular de Cuenca, pues una proporción similar se da a nivel nacional (Barragán-Escandón, 2019).

En la Figura 1 se describe la energía secundaria, que se requiere en la parte urbana de Cuenca. A la derecha se muestra la energía de los requerimientos de energía: gas licuado de petróleo, electricidad, fueloil, diésel y gasolina. En el interior de la ciudad no se tienen centros de transformación, por tanto, esta energía se destina a usos residenciales, comerciales e industriales, principalmente.

En Cuenca el transporte es el principal consumidor de energía urbana (59,90 % del total), luego le sigue la industria (20,76 %), el sector residencial (13,72 %), el comercial (3,15 %), el alumbrado público (0,68 %), mientras que otros sectores consumen en total un 1,79 %. En cuanto a la energía eléctrica urbana, el sector residencial es el principal consumidor, con un 39 %, seguido por la industria con un 23,59 %, comercio con 22,72 %, el alumbrado público con 7,07 % y otros servicios (7,64 %). El gas natural y el fueloil participan de manera marginal y son utilizados preponderantemente en el sector industrial. Según los registros disponibles, prácticamente la totalidad de la gasolina es utilizada con fines de transporte. El diésel es demandado por el transporte (81,42 %), la industria (16,13 %) y otros usos (2,44 %). Mientras que, el gas licuado de petróleo (GLP) lo emplea el sector residencial (67,19 %), seguido por la industria (24,52 %) y en menor medida el sector comercial y otros servicios (8,30 %) (Barragán-Escandón, 2019).

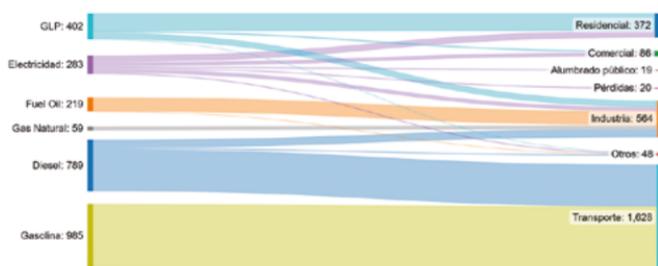


Figura 1. Diagrama de Sankey del consumo energético en Cuenca

Gracias al clima ecuatorial andino de Cuenca, la demanda energética residencial de la ciudad no alcanza el 14 % del total, es decir, una cuarta parte respecto a la demanda del sector del transporte. Esto difiere de climas estacionales, en donde las exigencias climáticas hacen que el sector residencial supere el 60 % del total de la demanda de energía urbana.

Para 2015 se estimó que cerca de 128 072 vehículos circularon en el área urbana de la ciudad. Esto es cerca del 80 % de

1 Las fuentes de energía secundaria proceden de la transformación de fuentes de energía primaria, y no están presentes en la naturaleza por sí mismas.

los vehículos registrados en el cantón. El 89,32 % de unidades requieren gasolina, principalmente vehículos particulares, y el resto diésel. De los vehículos a diésel, el 95,53 % de unidades se utiliza para el transporte de pasajeros (CGA, 2009; EMOV EP, 2011, 2012, 2015). En ese mismo año, la energía requerida para el transporte interno en la ciudad fue de 1 627,56 kBEP. Del total de esta energía, el 60,51 % fue utilizada por vehículos de uso particular y el 39,49 % por vehículos a diésel. De entre los vehículos que utilizan diésel, el 75,85 % de la energía fue consumida por el transporte de pasajeros y el 24,15 % por el de carga (Figura 2).

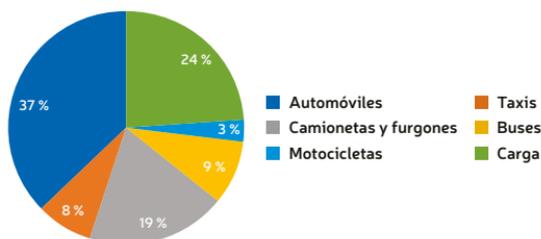


Figura 2. Participación energética del transporte (Barragán-Escandón; 2018).

En consecuencia, el mayor impacto ambiental desde el punto de vista de la energía es el transporte energizado por combustibles fósiles, y es en donde se deben implementar alternativas tecnológicas como el transporte energizado con electricidad.

Potencial fotovoltaico en cubiertas

La generación fotovoltaica (FV) en edificaciones permitiría cubrir no solo el consumo eléctrico actual sino incluso reemplazar la energía térmica de gas licuado de petróleo utilizado en cocinas, calefones y secadoras, logrando así edificaciones energéticamente neutras. Además, los excedentes de la energía FV

podrían inyectarse a la red eléctrica para energizar vehículos de transporte público, o directamente vehículos privados. Estos últimos se pueden considerar incluso como un electrodoméstico más que se integra a la vivienda (Doroudchi et al., 2018).

En una investigación reciente establecimos que con 6 m² de paneles fotovoltaicos (PFVs) es posible cubrir la demanda eléctrica típica actual de una residencia de cuatro habitantes. Si se considera además la electrificación de las demandas térmicas típicas, como cocción, secado de ropa y transporte, la demanda total podría cubrirse con hasta 36 m² de PFVs. En el caso de Cuenca, son comunes viviendas y edificaciones de baja altura con alta exposición al sol en sus cubiertas, constituyendo una situación ideal para la instalación de paneles. Además, las condiciones climáticas de la ciudad posibilitan que un PFV de 400 Wp de aproximadamente 1,80 m², obtenga alrededor de 13 000 kWh durante su vida útil (25 años). Esto implica cubrir el consumo de un auto familiar típico en su recorrido de 80 000 km con un solo panel (Zalamea-León & Barragán-Escandón, 2019).

En la investigación publicada en Barragán-Escandón et al. (2019) y Zalamea y Barragán (2021) pudimos establecer que el potencial de energía solar total en Cuenca urbana es de 1 454,90 GWh, mientras que la energía eléctrica requerida para abastecer la demanda estaba en 455,70 GWh (282,13 kBEP), incluidas las pérdidas. En otras palabras, se dispondría de a 3,19 veces la demanda de electricidad de la ciudad. Esto gracias a las ventajas geográficas, climáticas y a la importante superficie de techos inclinados o terrazas planas que reciben irradiación solar sin importar su orientación (Barragán-Escandón et al., 2019; Zalamea y Barragán, 2021).

Transición de autobuses convencionales a autobuses eléctricos en el transporte público urbano

Para el 2020 en Cuenca circulaban 424 autobuses, con 29 rutas que recorrían 112 000 km, requiriendo 11 175 galones de diésel al día y emitiendo 112 toneladas de CO₂ (Wenz et al., 2021). La

evidencia científica reciente indica que los vehículos eléctricos (VEs) generan menores impactos ambientales que los vehículos con motores de combustión interna en diversos escenarios (Franzò & Nasca, 2021). Puesto que la generación eléctrica de Ecuador es mayoritariamente hidráulica, las ventajas de reemplazar autobuses convencionales con motor a diésel por autobuses eléctricos (ABEs) son aún mayores. En este sentido, la Ley Orgánica de Eficiencia Energética vigente en Ecuador desde el 2019 indica en su artículo 14 que: "A partir del año 2025 todos los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e inter-parroquial, en el Ecuador continental, deberán ser únicamente de medio motriz eléctrico"; sin embargo, una reforma en 2024 extendió este plazo hasta el 2030.

El reemplazo de autobuses convencionales por ABEs es costoso. Debido a que los recursos son limitados, el reemplazo deberá ser gradual y progresivo, por lo que es esencial determinar criterios que permitan iniciar el proceso de transición de forma eficiente y garanticen su viabilidad.

En Wenz et al. (2021) hemos propuesto una metodología que incluye cuatro criterios técnicos que permiten priorizar las rutas de transporte público existentes en Cuenca para reemplazar autobuses convencionales por ABEs: a) el estado de carga de la batería (SoC, por sus siglas en inglés), b) la proporción de distancia transitada en un área crítica, c) el ahorro de emisiones de CO₂, y d) el número de pasajeros transportados. Para evaluar estos criterios, se ha realizado un monitoreo detallado de las rutas de los autobuses del sistema de transporte urbano de la ciudad mediante GPS. A continuación, se detallan cada uno de los criterios.

Estado de carga de la batería (SoC)

El SoC, se expresa como el porcentaje de energía que está almacenada en la batería en un momento dado. Los datos de GPS permitieron estimar la velocidad, aceleración y pendiente en cada punto del recorrido. Con estos datos creamos un modelo matemático para calcular la cantidad de energía demandada desde la batería de cada autobús en cada trayecto. Al considerar

que la batería inicia con un SoC del 100 % al inicio de su jornada laboral es posible conocer la carga final de la batería al final del día, en función de la trayectoria y el número de recorridos que ha realizado. En este estudio se considera viable el uso de ABEs siempre que el SoC al final del día sea mayor al 20 %. Las rutas que provean el mayor SoC al final del día deben tener prioridad para la migración ya que esto garantiza una mayor vida útil de la batería. En el caso particular de Cuenca y con el modelo de ABE analizado, solo 11 de las 29 rutas cumplen esta condición.

Proporción de distancia transitada en un área crítica

Las ciudades tienen áreas críticas tales como zonas escolares, hospitalarias, históricas, protegidas, entre otras, en las que es prioritario disminuir el ruido y la contaminación local producidos por el tráfico motorizado. Mientras más distancia recorra un autobús convencional por un área crítica, más impacto positivo tendrá su reemplazo por un ABE y, por tanto, tendrá mayor prioridad. En este estudio hemos considerado el centro histórico de Cuenca como el área crítica, destacándose que 24 de las 29 rutas cruzan por él.

Ahorro de emisiones de CO₂

La quema de combustibles fósiles, y en particular de diésel, provoca la emisión de contaminantes nocivos para el medio ambiente y las personas, incluyendo monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas finas (PM₁₀) y ultrafinas (PM_{2,5}), que pueden llegar a los pulmones y causar problemas respiratorios. Los autobuses que recorran las rutas con mayor cantidad de emisiones deben tener mayor prioridad para su reemplazo por ABEs. Las variables consideradas para cuantificar las emisiones contaminantes son la distancia total de la línea, su relieve, el número de autobuses trabajando en la ruta, número de recorridos que realiza cada uno y la eficiencia del vehículo. Se estima que, en Cuenca, un autobús promedio recorre 7,84 km por cada galón de diésel, mientras que uno eléctrico recorre 0,8 km por cada kWh. Estos indicadores re-

velan un potencial de reducción de emisiones muy importante.

Número de pasajeros desplazados

Un ABE es más costoso que un autobús convencional, por lo que para garantizar la recuperación de la inversión y hacerla más atractiva, se requiere una mayor afluencia de pasajeros en un menor tiempo. En Cuenca, la cámara de transporte ha implementado desde hace varios años una “caja común”, en la cual se juntan los ingresos por pasajes de todas las operadoras. En este escenario, la transición a ABEs traerá beneficios económicos generales. Por ejemplo, si una ruta tiene un mayor número de pasajeros se requerirán más unidades que consumirán más recursos, tales como combustible, aceite y mantenimiento, mientras que en un vehículo eléctrico estos costos variables son mucho menores, beneficiando a todos los involucrados. Además, la exposición a una nueva tecnología facilita su aceptación y puede acelerar la transición hacia la electromovilidad. Por lo tanto, las rutas con mayor número de pasajeros tendrán una mayor prioridad para ser operadas con ABEs. De todas maneras, la adopción de ABEs por parte de las operadoras de transporte deberá tener en cuenta estos costos dentro de su modelo económico.

A cada uno de estos cuatro criterios se les ha asignado un puntaje utilizando una técnica multicriterio con la participación de 13 expertos en el área. Los resultados indican que el criterio con mayor peso es el SoC de la batería, tal como se ve en la Tabla 1 (Wenz et al., 2021). El puntaje total resulta de la suma del puntaje de cada criterio multiplicado por su peso, de tal manera

Tabla 1. Pesos de los criterios resultantes

Criterio	Peso
Estado de carga	0,277
Distancia proporcional en área crítica	0,216
Emisiones de CO ₂	0,245
Número de pasajeros	0,262

que las rutas con mayor puntaje serán las prioritarias para la transición hacia la movilidad eléctrica.

A partir de estos resultados hemos seleccionado tres rutas prioritarias para iniciar la transición: 18, 19 y 14 (Figura 3). En

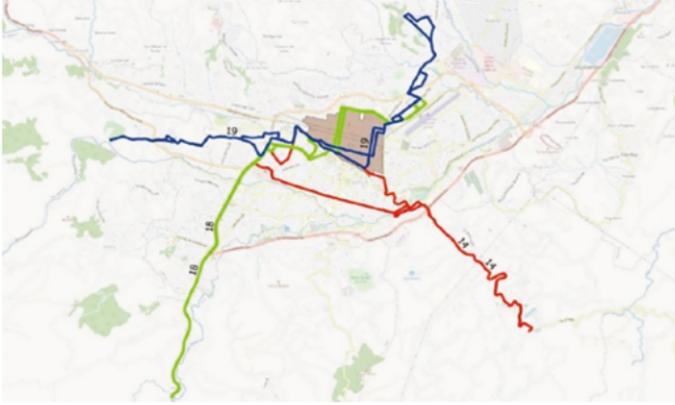


Figura 3. Tres rutas prioritarias.

ellas, 50 autobuses recorren una distancia diaria total de unos 9 060 km/día. Su sustitución por ABEs evitaría el uso de 1 328 galones de diésel diarios y, por lo tanto, reduciría la emisión de más de 13,3 toneladas métricas de CO₂ y otros gases contaminantes. El ahorro económico debido al consumo de electricidad alcanza el 83 % con respecto al consumo de diésel.

En otro estudio, Martínez-Maldonado et al. (2023), propusimos un método más completo para priorizar la migración gradual de los autobuses convencionales a ABEs considerando múltiples criterios técnicos, sociales, ambientales, económicos y de ubicación. Mediante la técnica multicriterio PROMETHEE, establecimos un *ranking* de rutas y propusimos las que serían prioritarias para la transición. PROMETHEE es una técnica de toma de decisiones que permite ordenar y seleccionar alternativas a partir de criterios en conflicto de diferentes ámbitos. El método emplea una matriz de alternativas y criterios para evaluar las opciones consideradas. Se asignan pesos a los criterios

para reflejar su importancia relativa. Con esta información, se establecen relaciones de dominancia entre las alternativas, lo que permite identificar las alternativas preferidas, indiferentes o incomparables (Brans y Mareschal, 2005; Mateo, 2012).

En este nuevo estudio no consideramos las limitaciones en el SoC de la batería de los autobuses, ya que las restricciones tecnológicas en el almacenamiento de energía se van superando paulatinamente, así como tampoco se dio prioridad a las rutas que pasan por el centro histórico. Los resultados de este estudio determinaron que los criterios más importantes fueron, en orden descendente: a) número de pasajeros, b) longitud de la ruta, c) energía consumida por cada unidad en un trayecto de ida y vuelta, d) energía consumida por todos los autobuses de una ruta, e) potencia eléctrica requerida por cada ruta y f) contaminación producida por cada ruta. Los resultados mostraron que, en una primera fase, 68 autobuses podrían ser sustituidos por ABEs en cinco rutas diferentes (líneas 13, 7, 16, 28 y 27). Las rutas prioritarias en este caso no coinciden con las del estudio anterior debido a la exclusión del criterio de SoC de los ABEs actuales. La migración hacia los ABEs podría reducir el consumo de energía primaria, las emisiones de gases contaminantes, así como también el costo operativo debido a la disminución de los costos por conceptos de combustible.

Las metodologías propuestas en estos estudios pueden ayudar a los gobiernos locales a identificar las rutas de autobuses adecuadas para iniciar la transición hacia la electromovilidad. Su aplicación es factible en cualquier ciudad que cuente con la información requerida: las características técnicas de los autobuses actuales y los ABEs, los detalles operativos de las rutas existentes y el número de pasajeros por ruta. Además, estas herramientas proporcionan un medio para calcular los costos actuales de combustible, las emisiones de CO₂ para cada línea de autobús y los costos estimados de electricidad.

Estas propuestas son relevantes para ciudades de todo el mundo que buscan reducir su huella de carbono y mejorar la calidad del aire, especialmente en ciudades de países en desarrollo que enfrentan desafíos específicos para la electrificación del transporte público. Es especialmente aplicable para ciuda-

des con climas andinos ecuatoriales, en donde sus bondadosos niveles de irradiación solar implican un potencial excedente eléctrico de la microgeneración urbana a gran escala. Finalmente, este tipo de estudios proporcionan información valiosa para los planificadores de transporte y los responsables de políticas públicas que buscan mejorar la sostenibilidad y la eficiencia del transporte público en sus ciudades.

Producción de hidrógeno verde para el transporte público

Actualmente, el parque automotor de Cuenca se alimenta casi exclusivamente de derivados de combustibles fósiles. Por esta razón, en el estudio publicado en Barragán-Escandón et al. (2020) analizamos el potencial de fuentes energéticas limpias existentes dentro de los límites urbanos de Cuenca que podrían sustituir estos combustibles y su relación con las demandas energéticas. En la Figura 4, se muestran las energías a ser utilizadas del lado izquierdo y los sectores en donde se consumen del lado derecho.

A diferencia de la Figura 1, en este escenario, se incluyen centros de transformación que corresponden a centrales de

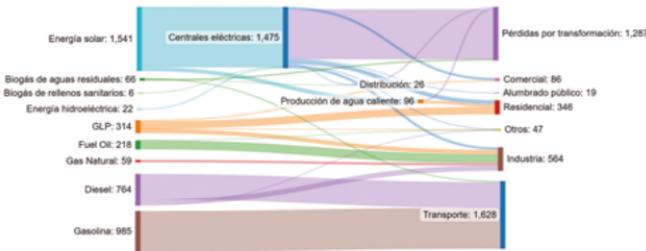


Figura 4. Diagrama de Sankey de potenciales recursos energéticos dentro de los límites urbanos versus los consumos urbanos (kBE) para la ciudad de Cuenca. Fuente. Barragán-Escandón (2019).

producción de electricidad a partir del recurso solar, hídrico o biogás. Además de usos para el calentamiento de agua a partir de energía solar térmica, y biogás proveniente de aguas residuales destinados al transporte. Toda la energía primaria aprovechable a través de tecnologías renovables, es aquella que está dentro de los límites del área urbana de Cuenca.

La inclusión de la microgeneración FV para cubrir una parte de la demanda de transporte es una forma lógica de maximizar el autoabastecimiento energético urbano. Este autoabastecimiento se podría incrementar almacenando energía para mitigar los desequilibrios causados por la intermitencia solar y la demanda. Se ha determinado que en la zona céntrica de Cuenca se pueden gestionar los excedentes de energía generados durante el día para cubrir el 46 % de la demanda de transporte de sector residencial. Para lograr esto, se necesita cubrir aproximadamente el 16 % del techo disponible con paneles FV (Zambrano-Asanza et al., 2019).

En este sentido, hemos estudiado la posibilidad de producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua para alimentar vehículos de transporte público en Cuenca utilizando el excedente de energía de una eventual producción fotovoltaica (Cevallos Escandón et al., 2023). El hidrógeno es un combustible de alta potencia que tiene la posibilidad de mover motores de distinta escala, desde automóviles hasta aviones o barcos. Además, los vehículos energizados con hidrógeno pueden reemplazar con rapidez sus celdas de combustible.

Si se instalaran paneles fotovoltaicos en los techos de las edificaciones en el Centro Histórico de Cuenca para alimentar celdas de hidrógeno, se podría abastecer a 475 autobuses eléctricos, supliendo entre el 97 % y 127 % de su demanda energética. Esto evitaría el consumo de unos 11 175 galones de diésel al día, y libraría la emisión de 112 Tm de CO₂. Aunque la tecnología de celdas de combustible está en desarrollo, su uso podría ser una solución sostenible como alternativa a los subsidios de los combustibles (Cevallos Escandón et al., 2022).

Recomendaciones

El sector del transporte es el gran consumidor de energía en Cuenca, por este motivo es indispensable focalizar políticas para disminuir el uso del vehículo particular. La introducción del transporte eléctrico público y privado resulta estratégica para reducir el uso de combustibles fósiles y maximizar la autosuficiencia energética urbana.

La mejora en el transporte público es fundamental para una movilidad sostenible y es imperativo que los gobiernos locales fomenten un sistema público eficiente, seguro y libre de emisiones. Los gobiernos autónomos descentralizados tienen la obligación de democratizar la movilidad de sus ciudadanos, con el desarrollo de planes, políticas e infraestructura de movilidad activa y sostenible. La sustitución de la gasolina y el diésel por gas natural, electricidad o hidrógeno, son políticas que deben ser consideradas. Más aún al tomar en cuenta que el potencial fotovoltaico integrado al entorno urbano de Cuenca, cubriría 3,5 veces la demanda eléctrica total.

La transición a ABEs en el transporte público urbano puede tener importantes beneficios ambientales, al reducir las emisiones de gases contaminantes y mejorar la calidad del aire en las ciudades, así como beneficios económicos a mediano y largo plazo para los transportistas, el estado y la sociedad en general.

Sin embargo, la transición a la electromovilidad no está exenta de dificultades y obstáculos, por un lado, existe desconianza por parte de los consumidores a estas nuevas tecnologías, en especial de vehículos de mediano y gran tamaño, ya que el costo de las baterías es proporcional al tamaño del vehículo; existe un temor generalizado de que las baterías tengan una vida útil reducida y los costos de reposición sean elevados. Por otro lado, el costo inicial de los vehículos eléctricos es mayor que el de los vehículos convencionales, lo cual se convierte en una barrera para su introducción al mercado. Además, la introducción masiva de vehículos eléctricos requiere de una fuerte inversión en infraestructura a nivel país, tal como la instalación de

cargadores, repotenciación de las redes de distribución, nuevas plantas de micro o macrogeneración de energía eléctrica. Finalmente, la energía eléctrica en el país también tiene subsidio, por tanto, los costos ficticios de la energía seguirán distorsionando el mercado energético, con los consecuentes perjuicios al estado ecuatoriano. Por tal motivo la autogeneración eléctrica se considera una opción adecuada para la realidad del país.

Las políticas y planificación urbana de los gobiernos locales no suelen considerar el consumo de energía en la ciudad. Decisiones erróneas o mal informadas aumentan el riesgo, la inseguridad energética de la ciudad y la dependencia de combustibles fósiles, con sus consecuentes impactos en la salud y calidad de vida de la población. Las investigaciones de este capítulo presentan información clave para la transición energética de la ciudad en el sector del transporte, posibilitando su autoabastecimiento de forma técnica, práctica y económicamente viable.

Referencias

Barragán-Escandón, A., Zalamea-León, E., y Terrados-Cepeda, J. (2019). Incidence of Photovoltaics in Cities Based on Indicators of Occupancy and Urban Sustainability. *Energies*, 12(5), 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en12050810>

Barragán-Escandón, E. A. (2019). El autoabastecimiento energético en los países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso Cuenca, Ecuador [Tesis doctoral, Universidad de Jaén]. Repositorio institucional.

Barragán-Escandón, E. A., Zalamea-León, E. F., Terrados-Cepeda, J., y Vanegas-Peralta, P. F. (2020). Energy self-supply estimation in intermediate cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109913>

Brans, J.-P., y Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. In J. Figueira, S. Greco, & E. Matthias (Eds.), *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. International Series in Operations Research & Management Science* (pp. 163–195). Springer Science. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_5

Cevallos Escandón, A. M. A., Barragán-Escandón, B. E. A., Zalamea-León, E., y Serrano-Guerrero, X. (2022). Hydrogen capacity for use in public transportation using the excess electricity generated by photovoltaics from rooftops in the urban area of Cuenca, Ecuador. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 49–54. <https://doi.org/10.24084/repqj20.215>

Cevallos-Escandón, A., Barragán-Escandón, E. A., Zalamea-León, E., Serrano-Guerrero, X., y Terrados-Cepeda, J. (2023). Assessing the Feasibility of Hydrogen and Electric Buses for Urban Public Transportation using Rooftop Integrated Photovoltaic Energy in Cuenca Ecuador. *Energies*, 16(14), 5569.

CGA. (2009). Resumen del inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, año base 2007.

Doroudchi, E., Alanne, K., Okur, Ö., Kyyrä, J., y Lehtonen, M. (2018). Approaching net zero energy housing through integrated EV. *Sustainable Cities and Society*, 38, 534–542. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.042>

EMOV EP. (2011). *Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, 2009*.

EMOV EP. (2012). *Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, 2011*.

EMOV EP. (2015). *Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, 2014*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17665.66405>

Franzò, S., y Nasca, A. (2021). The environmental impact of electric vehicles: A novel life cycle-based evaluation framework and its applications to multi-country scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128005>

Martínez-Maldonado, V., Barragán-Escandón, A., Serrano-Guerrero, X., y Zalamea-León, E. F. (2023). Optimal routing for mass transit systems using multicriteria methodologies. *Energy Strategy Reviews*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101077>

Mateo, J. (2012). *Multi criteria analysis in the renewable energy industry*. Springer-Verlag London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2346-0>

Wenz, K. P., Serrano-Guerrero, X., Barragán-Escandón, A., González, L. G., y Clairand, J. M. (2021). Route a study of case in anoute prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: A new methodology a intermediate city of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111215>

Zalamea-León, E., y Barragán-Escandón, A. (2019). Indicadores de captación fotovoltaica y solar térmica para ciudades ecuatoriales andinas, para demandas de núcleos familiares y consumos urbanos. *ÑAWPAY Revista Técnica Tecnológica*, 20, 1–6.

Zalamea, E., y Barragán, A. (2021). *Arquitectura, Sol y Energía*. UCuenca Press.

Zambrano-Asanza, S., Zalamea-León, E. F., Barragán-Escandón, E. A., y Parra-González, A. (2019). Urban photovoltaic potential estimation based on architectural conditions, production-demand matching, storage and the incorporation of new eco-efficient loads. *Renewable Energy*, 142, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.105>

Descarbonización del transporte en Cuenca

Gustavo Álvarez-Coello  0000-0001-9332-7237
Andrés Baquero-Larriva  0000-0002-1757-5826
Mateo Coello-Salcedo  0000-0003-1379-8026
Daniel Cordero-Moreno  0000-0002-2155-2627
Efrén Fernández-Palomeque  0000-0003-2188-9446
Robert Rockwood-Iglesias  0000-0001-5607-0807
Francisco Torres-Moscoso  0000-0001-6517-4413
Universidad del Azuay

Puntos clave

- Se desarrolló un dispositivo y un método para determinar el ciclo de conducción de vehículos.
- Se generó información clave para la determinación de tarifas de transporte público.
- Los contaminantes atmosféricos de la ciudad están fuertemente determinados por el transporte.
- Al capacitar a conductores en técnicas de manejo eco-eficiente, se disminuyó el consumo de combustible en un 8 %.
- Estrategias para descarbonizar el transporte en la ciudad.
- Diseño y fabricación de vehículos eléctricos.

Introducción

Durante la última década, ha sido evidente la creciente necesidad de propuestas y soluciones para empresas públicas y privadas en diversos ámbitos de la ingeniería automotriz. Estas soluciones incluyen, por ejemplo, la configuración energética de

flotas de transporte, la obtención de parámetros técnicos para establecer tarifas en el transporte público y privado, la selección de vehículos eléctricos y generación de estrategias de movilidad sostenible, tranvía, disminución de emisiones contaminantes provenientes de los vehículos, entre otras.

A finales de 2014, varios compañeros nos encontramos, tras finalizar nuestros estudios de posgrado, y coincidimos en la importancia de abordar estos desafíos. Gracias al apoyo de la Universidad del Azuay, en febrero de 2015 decidimos fundar formalmente ERGON, el Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Automotriz de la Universidad del Azuay, dedicado a investigar y trabajar en las áreas de diseño mecánico, energía y medio ambiente, con el objetivo de brindar soluciones innovadoras y avanzadas en el campo de la ingeniería automotriz. Desde esa fecha, ERGON ha venido trabajando en temas relacionados con energía, medio ambiente y diseño mecánico, enfocados en los vehículos y la movilidad.

En este capítulo presentaremos brevemente algunas de nuestras investigaciones sobre la cuantificación de la demanda energética en los vehículos, y la movilidad sostenible y electrificación del parque vehicular en Cuenca, como un aporte a la reducción del consumo de combustibles fósiles y de emisiones de carbono en los sistemas de transporte de la ciudad.

Vehículos y el medio ambiente

Determinación de ciclos de conducción

La determinación de las tarifas de transporte público requiere varios tipos de análisis: energético, financiero y evaluación de impacto ambiental. Estos análisis deben contar con información detallada sobre las acciones y comportamientos del vehículo, o "condiciones de operación", incluir las velocidades de circulación, las aceleraciones que realiza, las pendientes y el rendimiento de combustible (kilómetros por galón), entre otras. Las condiciones de operación, junto con los costos de mantenimiento, determinan los costos variables de operación de una flota vehicular (Duque et al., 2018).

En este contexto, en ERGON hemos desarrollado una amplia experiencia para determinar las tarifas de transporte, basada en un exhaustivo análisis de la operación de la flota de vehículos analizada y sus costos variables. Para esto, implementamos un sistema de adquisición de datos de bajo costo, el cual integra diversos dispositivos y tecnologías, como sistemas GPS y medidores de flujo de combustible. La información registrada se almacenan a través de una línea de datos única en un archivo .CSV, en una tarjeta SD que se se puede abrir en cualquier computador. Este sistema funciona con los vehículos que operan en el país y permite registrar mediciones instantáneas, en tiempo real, del consumo de combustible y la localización geográfica (Baquero-Larriva y Álvarez-Coello, 2018).

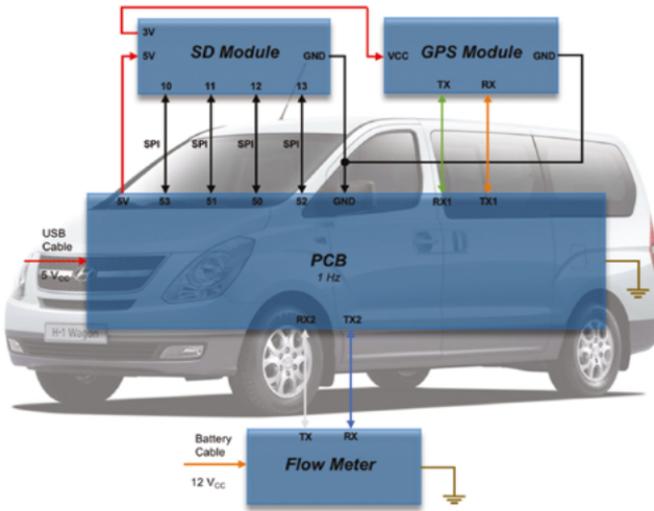


Figura 1. Arquitectura del sistema de adquisición de datos.

Este equipo permite conocer las condiciones reales de operación de los vehículos durante sus recorridos diarios. A través del registro de los viajes, se pueden definir los patrones de operación de los distintos vehículos, lo que permite la obtención

de los ciclos de conducción (curva de velocidad versus tiempo que describe los patrones típicos de manejo de una región o ciudad), mismos que son claves para determinar el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

Si bien no existe un método estándar para definir los ciclos de conducción, hemos desarrollado una metodología específica para obtener ciclos de conducción en taxis y autobuses en Cuenca. El enfoque propuesto por ERGON implica realizar múltiples viajes (al menos 30) con uno o varios vehículos y luego seleccionar aquel viaje que mejor represente el conjunto de viajes realizados. Esta selección se basa en determinar la demanda energética que se acerque al promedio de los viajes realizados. El viaje seleccionado se convierte en el ciclo típico de conducción que representa lo que comúnmente hacen los vehículos en la ruta o región analizada (Cordero-Moreno, Dávalos, et al., 2018)

Transporte y contaminación: de los datos al conocimiento

Como grupo de investigación reflexionamos sobre la importancia de transformar los datos en información y convertir esta información en conocimiento útil para la planificación y la proyección de escenarios. Si no se toman medidas oportunas basadas en el conocimiento, los impactos negativos relacionados con el tráfico vehicular pueden aumentar de manera exponencial.

A raíz de la investigación sobre las tarifas de transporte y ciclos de conducción, surgió un interés particular en la movilidad de la ciudad y sus diferentes facetas. Se tenía claro que, para desarrollar investigaciones con impacto positivo en la sociedad, era fundamental contar con una gran cantidad de datos y que estos fueran de calidad, de esta manera, se podrían determinar soluciones pertinentes para nuestro entorno. Un recurso importante con el que contamos es la base de datos del sistema de monitoreo de calidad del aire, que se encuentra alojada en la página web del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) de la Universidad del Azuay¹. Esta base de datos proporciona información sobre la concentración de contaminantes criterio, como el CO (Monóxido de carbono), PM_{2,5} (Material particulado inferior 2,5 micras de tamaño), NO₂ (Dió-

¹ <https://ierse.uazuay.edu.ec/proyectos/sistemagrafico.php>

xido de nitrógeno) y SO_2 (Dióxido de azufre). Es importante destacar que, aunque se conozca la concentración, el sistema no establece la fuente de dichas emisiones (Sellers Walden, 2013).

Con este antecedente, desde ERGON estudiamos los índices de concentración de contaminantes de los informes de calidad de aire de la EMOV EP en función de fechas y horas específicas. Uno de los principales hallazgos fue que los índices de concentración de emisiones llegan a duplicarse en las horas de mayor circulación vehicular. Otro resultado interesante fue el impacto de la movilidad con fines educativos en la calidad del aire, pues el índice de concentración de CO disminuye en agosto, coincidiendo con las vacaciones del sistema educativo. Para más detalles, se pueden consultar los informes de calidad de aire (EMOV, 2023).

El tráfico vehicular, y en concreto, el uso del vehículo privado, produce varias externalidades negativas e impactos, entre ellas la generación de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio², que pueden afectar la salud de las personas. En un estudio desarrollado por nuestro centro de investigación en el 2020 aplicamos una metodología planteada por Todd Litman (2013) del Instituto de Políticas de Transporte de Victoria, donde se determina el incremento de las externalidades, por efecto del tráfico vehicular. Esta metodología requiere definir la hora valle y la hora pico en una localidad y medir los parámetros a ser evaluados en cada uno de los escenarios.

Para aplicar este estudio en Cuenca, instrumentamos 20 taxis durante 3 meses para recolectar datos de localización, velocidad, pendientes, aceleración, velocidad del motor, consumo de combustible, entre otros. A partir de estos datos fue posible recopilar información sobre rutas de circulación, matrices origen-destino, consumo de combustible, estimación de emisiones, velocidades y aceleraciones promedio. Además, cuantificamos las externalidades negativas del tráfico vehicular en Cuenca, trazamos mapas de calor del tráfico vehicular y determinamos horas pico y valle de la ciudad en los días típicos.

En este estudio pudimos encontrar que la velocidad promedio en la ciudad varía desde 24,6 a 13,2 km/h entre la hora valle y la hora pico, respectivamente. Esto produce un 85 % más

2 Los contaminantes criterio son aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población.

de tiempo en los desplazamientos, lo que se traduce en un incremento de la demanda energética en el orden del 60 % y de las emisiones de CO₂ en un 12 % (Romero et al., 2020).

Mejora de las técnicas de conducción

A partir de los datos de consumo instantáneo de combustible, hemos realizado proyectos de conducción eficiente (*eco-driving*). Esta técnica implica una serie de prácticas de conducción que pueden ayudar a reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunos ejemplos de estas técnicas son mantener una velocidad constante y moderada, evitar frenadas y aceleraciones bruscas, hacer los cambios de marcha a tiempo y anticiparse al tráfico. Al utilizar estas técnicas, los conductores pueden ahorrar dinero en gastos de combustible y prolongar la vida útil de los componentes del vehículo, además de contribuir a reducir su huella de carbono y proteger el medio ambiente.

Con la ayuda del dispositivo desarrollado para medir el consumo de combustible y la ubicación del vehículo se monitoreó una flota de transporte de 26 vehículos en la ruta Cuenca-Loja (200 km aproximadamente). Los conductores fueron capacitados en técnicas de conducción eficiente y luego de su aplicación se encontraron reducciones en el consumo de combustible de un 8 %. Estas técnicas pueden ayudar a reducir el consumo de combustible en el transporte con una baja inversión (Álvarez-Coello et al., 2018).

Movilidad sostenible

El análisis de la demanda energética del transporte en la ciudad ha sido otro de los temas que hemos trabajado dentro de ERGON. Se han evaluado motores de combustión interna, motores eléctricos y medios alternativos de transporte, como bicicletas mecánicas y eléctricas.

Buses eléctricos

A partir de los ciclos de conducción mencionados en la sección anterior, desarrollamos un modelo para evaluar buses eléctricos y seleccionar las configuraciones de buses que sean capaces de cubrir segmentos con altas pendientes, como el de la subida de La Condamine (el Vado) o El Carmen de Sinincay y que sus baterías duren todo el día de trabajo (Cordero-Moreno, Zumba, et al., 2018). Los resultados del modelo fueron contrastados aprovechando la disponibilidad de un bus eléctrico que estuvo operando en la ciudad a inicios del 2019 y cuyos consumos y datos dinámicos fueron monitoreados en conjunto con compañeros de la Universidad de Cuenca (González et al., 2021). A partir del modelo validado se desarrolló una metodología para seleccionar modelos de autobuses eléctricos adecuados para Cuenca considerando los aspectos técnicos, energéticos y financieros. El análisis financiero determinó algunos retos por solventar, el principal fue el costo inicial de las unidades, así como el precio de repuestos y mantenimiento, por lo que es necesario establecer mecanismos para financiar estos costos. Estos mecanismos pueden incluir financiamiento desde el gobierno central o local, la utilización de buses más pequeños, o el aumento de las tarifas. En todo caso, estos retos implican también decisiones a nivel de políticas públicas nacionales y locales (Torres-Moscoco et al., 2022).

Vehículos eléctricos particulares

Para incrementar la autonomía y disminuir el peso de los vehículos eléctricos presentes en el mercado local, hemos trabajado en una metodología que incluye la utilización de diferentes tipos de baterías. Los resultados muestran que con el cambio de baterías se reduce el peso total del vehículo seleccionado cerca de un 25 % y, en el caso de la autonomía, se observa una mejora de hasta el 13 % en viajes cortos y hasta el 23 % en trayectos largos de un 99 % (Fernandez et al., 2022).

Bicicletas Eléctricas

La movilidad sostenible es esencial para enfrentar problemas como la congestión vehicular, la contaminación ambiental y la dependencia de los combustibles fósiles. Las bicicletas eléctricas (*e-bikes*) han ganado popularidad como una solución de transporte sostenible en todo el mundo y Cuenca, no es la excepción. En el 2015, mediante una alianza con la empresa privada se evaluó la viabilidad de emplear bicicletas eléctricas como una opción de transporte sostenible en Cuenca. El análisis se basó en el consumo de energía, el impacto ambiental, el costo y el tiempo de traslado. Se recopilaron datos con dispositivos GPS y se evidenció las diferencias que existen entre el consumo de energía, emisión de contaminantes, costos de operación y tiempos de trayecto entre las bicicletas eléctricas y los vehículos ligeros que funcionan con gasolina para recorrer la misma distancia 6.5 km aproximadamente. En términos de energía, las *e-bikes* consumen 40 veces menos energía que un vehículo ligero. En cuanto a la estimación de emisiones de dióxido de carbono, hubo una diferencia significativa entre los dos medios de transporte, incluso si una *e-bike* que recarga sus baterías desde una planta termoeléctrica emite 55 veces menos CO₂ que un vehículo. En cuanto al tiempo de viaje, los vehículos tienen una ligera ventaja, específicamente de 4 minutos, pero sin contar el tiempo requerido para estacionar. En resumen, los resultados obtenidos muestran una alta posibilidad de reemplazar el vehículo por la bicicleta eléctrica para circular por la ciudad. Por lo cual, el gobierno local podría promover nuevas políticas de movilidad basadas en estos datos (Álvarez et al., 2018).

Promoción de la Movilidad Sostenible

Para abordar los impactos negativos del tráfico vehicular se deben plantear soluciones estructurales. La educación para la sostenibilidad es una estrategia que puede contribuir a crear cambios conductuales y actitudes ambientales en las personas. Con este fin, desarrollamos un proyecto llamado "A la U en Bici", que buscaba fomentar la movilidad activa y sostenible en la comu-

nidad universitaria a través de la sensibilización de profesores, trabajadores y estudiantes. Además, se adquirieron bicicletas eléctricas para que cualquier miembro de la universidad pudiera experimentar y comparar el uso de este medio de transporte con el del vehículo privado.

Para llevar a cabo este proyecto, se desarrolló una aplicación para realizar el seguimiento a las personas que deseaban participar. Gracias a los datos obtenidos, se obtuvo matrices origen-destino, rutas de desplazamiento, distancias y tiempos promedio de desplazamiento. En la Figura 2, se aprecia una estructura iterativa del manejo de los datos. Inicialmente, se examinan los datos recolectados por dispositivos móviles, luego se obtienen las secuencias de viaje; posteriormente, se identifican patrones habituales para determinar un día típico, finalmente, la región bajo estudio se divide en zonas y se cuantifican los movimientos entre dichas zonas en distintos intervalos temporales, para obtener las matrices de demanda (Mendoza et al., 2020).

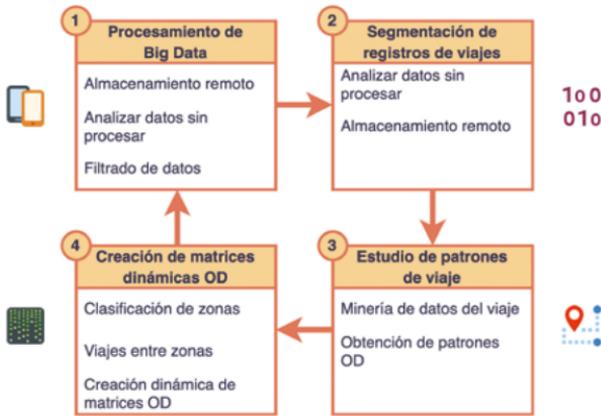


Figura 2. Procedimiento general para la minería de datos sobre movilidad.

Diseño y fabricación de prototipos

Para fomentar el crecimiento de la producción automotriz local, es esencial promover la expansión de las industrias fundamentales, como la siderúrgica y la química; así como, impulsar la fabricación local de máquinas-herramientas y herramientas que se utilizan en los procesos de producción automotriz.

La producción nacional de vehículos para movilidad sostenible tendría un impacto significativo en la creación de empleo, fomento de la economía y desarrollo de nuevas tecnologías. Además, contar con tecnología propia aportaría a la soberanía y disminuiría la dependencia en importaciones. De esta manera de esta manera se promovería la comercialización de vehículos eficientes, diseñados para satisfacer las necesidades propias de nuestras ciudades y sociedad.

Por ello ERGON, trabaja en diferentes proyectos para el diseño y la manufactura de vehículos con propulsión eléctrica, enfocados en la eficiencia energética, configuración del tren motriz y la creación de bastidores lo suficientemente rígidos. Los vehículos deben ofrecer la máxima estabilidad y seguridad durante condiciones extremas de conducción, con alta resistencia y el menor peso posible. Esto se logra por medio de la utilización de algoritmos de optimización topológica estructural, implementados a través de programas de Ingeniería Asistida por Computador.

El primer prototipo desarrollado en la Universidad del Azuay fue una motocicleta eléctrica, cuyo objetivo principal fue el análisis de su eficiencia energética, autonomía y diseño mecánico. Su evaluación cumplió con las necesidades de movilidad eléctrica para Cuenca. Además, a nivel internacional, en el 2013 se obtuvo el segundo lugar en el *Smart Moto Challenge*, llevado a cabo en España (E. Fernandez & Coello, 2017).

Gracias al apoyo de CEDIA (Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia) y la empresa Tratural Cía. Ltda. se diseñó y fabricó el segundo prototipo que fue otra motocicleta eléctrica urbana, con la intención de que se pueda producir masivamente. La motocicleta tiene un motor de 4 kW, un torque en rueda de hasta 65 Nm, cuenta con

una batería de 72 V y 40 Ah, con lo que se puede alcanzar una autonomía de 70 km (Figura 3a).



Figura 3a y 3b. Vehículos construidos en la Universidad del Azuay.

Finalmente, el tercer prototipo consistió en un vehículo eléctrico biplaza, en donde se empleó el diseño por computadora y se vincularon varias áreas como dinámica de fluidos, resistencia de materiales y dinámica de vehículos (Figura 3b).

Conclusiones

Es indispensable reducir el consumo de combustibles fósiles y, consecuentemente, las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio en el sector del transporte. Para ello es necesario medir, diseñar, simular, construir e implementar soluciones que permitan que el transporte de nuestra ciudad cumpla su misión; es decir, mover a las personas sin comprometer su salud y de una manera eficiente y limpia. ERGON trabaja en la medición y cuantificación de consumo de combustible y emisiones contaminantes, configuración energética de vehículos, estrategias para reducir el consumo energético en flotas de vehículos, optimización de la programación electrónica en vehículos, baterías para vehículos eléctricos, evaluación de sistemas alternativos de transporte y diseño y fabricación de vehículos eléctricos.

Referencias

Álvarez, G., Coello, M., López, A., & Ordóñez, S. (2018). Evaluation of the electric bicycle as an alternative mobility in the city of Cuenca, Ecuador. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <http://www.ieomsociety.org/paris2018/papers/99.pdf>

Álvarez-Coello, G., Baquero-Larriva, A., Cordero-Moreno, D., Muñoz-Falconí, J., y Rivas-Paz, F. (2018). Eco-driving techniques applied in a transport fleet in Ecuador: A case study with quantifiable and measurable techniques. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and*

Operations Management, 758–759. <http://www.ieomsociety.org/paris2018/papers/138.pdf>

Baquero-Larriva, A., y Álvarez-Coello, G. (2018). Low Cost Data Adquisition System to Register Fuel Consumption in Diesel Engine Vehicles. *2018 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*. doi:10.1109/CONIITI.2018.8587057

Cordero-Moreno, D., Dávalos, D., Coello, M., y Rockwood, R. (2018). Proposed criteria to determine typical vehicular driving cycles using minimum weighted differences. *WIT Transactions on the Built Environment*, 176, 329–338. doi.org/10.2495/UT170281

Cordero-Moreno, D., Zumba, W., Coello, M., y Torres, F. (2018). Modelo para la evaluación del desempeño energético de diversas configuraciones de buses eléctricos en la ciudad de Cuenca. In A. Yala (Ed.), *La Ingeniería Automotriz clave para el desarrollo sostenible de Ecuador*.

Duque, G., Orellana, I., Coello, M., y Cordero-Moreno, D. (2018). Analysis of the methodology for rate determination in commercial transportation service of conventional and executive taxis. *Enfoque UTE*, 9(4), 194–207. doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.343

EMOV EP (2023). *Informe de calidad de aire Cuenca 2018*. <https://www.emov.gob.ec/sites/default/files/CALIDAD%20DEL%20AIRE%202018.pdf>

Fernandez, E., y Coello, M. (2017). Comparative analysis of control techniques in drive systems for electric motorcycle. *2017 6th International Youth Conference on Energy, IYCE 2017*. doi.org/10.1109/IYCE.2017.8003710

Fernández, E. P., Cordero, D., y Morales, D. (2022). Method for Improving Battery System of the Medium Power

Electric Traction System. 2022 IEEE ANDESCON: Technology and Innovation for Andean Industry, ANDESCON 2022. doi.org/10.1109/ANDESCON56260.2022.9989665

González, L. G., Cordero-Moreno, D., y Espinoza, J. L. (2021). Public transportation with electric traction: Experiences and challenges in an Andean city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110768. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121000630>

Litman, T. (2013). *Congestion costing critique: critical evaluation of the "urban mobility report."* <https://trid.trb.org/view/1245892>

Mendoza, I., Álvarez, G., Coello, M., Lopez, J., y Carvallo, P. (2020). Automatic estimation of demand matrices for universities through mobile devices. 2020 IEEE ANDESCON, 1–6. doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272071

Romero, B., Coello, M., y Cordero-Moreno, D. (2020). *GPS Data Correction Through The IVE Model For Use In Vehicle Emission Estimates for Congestion Pricing.* 1–5. doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272080

Sellers Walden, C. A. (2013). *Publicación de los contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo en tiempo real de la ciudad de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC* [Tesis de posgrado, Universidad del Azuay]. *Repositorio institucional.* <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/2546>

Torres-Moscoso, D. F., Cordero-Moreno, D. G., Tonon-Ordóñez, L. B., y Fernández-Palomeque, E. E. (2022). Análisis Financiero para la Implementación de un Bus Eléctrico Urbano en la Ciudad de Cuenca. *Economía y Negocios*, 13(1), 133–149. <https://doi.org/10.29019/EYN.V13I1.939>

Implementación masiva de medios de electromovilidad en entornos urbanos y su impacto en la red eléctrica

Vinicio Iñiguez-Morán:  0000-0001-7494-191X

Danny Ochoa-Correa:  0000-0001-5633-1480

Juan Leonardo Espinoza:  0000-0002-7450-2084

1 Laboratorio de Micro-Red de la Facultad de Ingeniería,
Universidad de Cuenca

2 Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones (DEET), Universidad de Cuenca

Puntos clave

- Las bicicletas eléctricas son un medio de transporte eficiente y sostenible capaz de integrarse armónicamente en los planes de movilidad sostenible de Cuenca.
- La gestión adecuada de la carga de vehículos eléctricos puede amortiguar las variaciones de potencia que experimenta un sistema de generación solar fotovoltaico.
- Electrificar el transporte público de Cuenca es factible, pero requiere de inversión en infraestructura y una adecuada planificación.
- La implementación masiva de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en Cuenca es posible sin que esto comprometa la calidad del servicio eléctrico a nivel de media tensión.
- El hidrógeno “verde” puede ser un actor importante en la electromovilidad de la ciudad.

El presente capítulo da a conocer los resultados más relevantes de investigaciones que contribuyen a la implementación masiva de la electromovilidad en la ciudad de Cuenca, Ecuador realizadas por el Laboratorio de Micro-Red y el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca. Estas investigaciones han analizado el impacto que tendría esta masificación de la electromovilidad sobre la red eléctrica, para así proponer soluciones técnicas e innovadoras que faciliten la transición hacia una movilidad sostenible.

En este contexto, se presenta una breve revisión de cinco trabajos realizados en los últimos años sobre este tema. El primero, se enfoca en determinar la eficiencia energética de una bicicleta eléctrica (*e-bike*) que recorre las ciclovías de la ciudad y provee la caracterización completa del proceso de carga de la batería, junto con un análisis de la calidad de la energía. El segundo, propone una metodología para amortiguar las fluctuaciones de potencia de un sistema de generación solar fotovoltaico mediante el aprovechamiento de las baterías de vehículos eléctricos durante el proceso de recarga. El tercero, expone los resultados de un estudio de eficiencia energética de un bus eléctrico de batería (BEB) y determina la viabilidad técnica de reemplazar toda la flota de autobuses convencionales de Cuenca por BEB's. El cuarto trabajo analiza el impacto de la implementación de 23 estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos (VEs) sobre la red de distribución eléctrica. Este número de estaciones está pensado para atender la demanda proveniente de 11 500 VEs, equivalentes a un porcentaje de penetración del 10 % en la zona urbana de la ciudad. Finalmente, el quinto trabajo de investigación determina el potencial para la producción de hidrógeno verde al emplear la energía hidráulica que no se aprovecha en las centrales eléctricas del Complejo Hidroeléctrico Paute-Integral en condiciones hidrológicas favorables; además, analiza la viabilidad de reemplazar la flota de autobuses convencionales de transporte público de Cuenca,

por buses eléctricos alimentados por celdas de combustible de hidrógeno.

Los resultados de estas investigaciones proveen valiosos insumos que incluyen aspectos técnicos y económicos para fomentar la implementación masiva de medios de electromovilidad en Cuenca, de forma técnica y ambientalmente sostenible, sin comprometer la calidad del servicio eléctrico provisto a los ciudadanos.

Micromovilidad eléctrica en Cuenca

Cuenca, actualmente cuenta con 67 km de ciclovias distribuidas en el área del casco urbano de la ciudad. Estas se ampliarán y complementarán con la construcción de las interconexiones de las rutas existentes, para disponer de un circuito completo donde los usuarios puedan recorrer largas distancias (Sánchez Mendieta, 2022). El propósito de esta obra civil, implementada por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal del Cantón Cuenca y la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca (EMOV EP), es fomentar y facilitar la movilidad sostenible en la ciudad.

La disponibilidad de infraestructura ciclistica, y otras iniciativas tales como el proyecto Bici Pública Cuenca (EMOV EP y GAD Municipal de Cuenca, 2019), y el proyecto piloto de TUMI (por sus siglas en inglés de Transformative Urban Mobility Initiative) para desarrollar un plan integral de electromovilidad en Cuenca (TUMI, 2020), están motivando a los ciudadanos a emplear no solo bicicletas como medio de transporte urbano, sino también vehículos de micromovilidad eléctrica de baja velocidad, tales como bicicletas eléctricas (*e-bikes*) y monopatines (*e-scooters*) que emplean un motor eléctrico con accionamiento electrónico y una batería como fuente de energía para impulsar al vehículo. Estos dispositivos cuentan con un cargador de batería, muy similar al de un computador portátil, que se conecta fácilmente a un tomacorriente de pared para abastecerse de la energía de la red eléctrica pública.

En este contexto, el equipo de investigación del Laboratorio de Micro-Red eléctrica de la Universidad de Cuenca, realizó un estudio técnico de eficiencia energética a una de sus cinco *e-bikes* urbanas. El trabajo fue publicado bajo el título "Study of the Energy Efficiency of an Urban E-Bike Charged with a Standalone Photovoltaic Solar Charging Station and its Compliance with the Ecuadorian Grid Code No. ARCERNNR – 002/20" (Iñiguez-Morán et al., 2023). A continuación, se describen brevemente los resultados más importantes de esta investigación.

Con la batería de iones de litio cargada al 100%, es decir con 419 Wh de energía almacenados, la *e-bike* urbana bajo estudio provee una autonomía de 30,91 km en modo de asistencia eléctrica (sin propulsión física del usuario); aproximadamente la distancia que separa a las ciudades de Cuenca y Azogues a través de la Carretera Panamericana (Troncal de la Sierra, E35).

En un trayecto compuesto casi en su totalidad por ciclovías, el recorrido completo se realiza en dos horas y diez minutos a una velocidad promedio de 14,2 km/h. El proceso de recarga de la batería requiere aproximadamente cinco horas. Como parte del estudio, se implementó una estación de carga solar fotovoltaica aislada de la red eléctrica con los equipos disponibles en el laboratorio (paneles solares, inversor con batería y sistema de gestión de energía, y protecciones eléctricas), que constituye un prototipo de estación que bien puede incorporarse al plan integral de electromovilidad de Cuenca.

La eficiencia promedio calculada de la *e-bike* es 2,18 kWh por cada 100 millas, (161 km). Ya que el costo promedio del kilovatio-hora en Ecuador, para un consumidor residencial, es de 0.092 dólares americanos (USD), el usuario deberá pagar 20 centavos de dólar por la energía eléctrica necesaria para recorrer 161 km, sin ningún o con un mínimo esfuerzo físico.

En lo que respecta a los indicadores de calidad del suministro eléctrico, el análisis del espectro de la corriente de carga concluyó que los niveles de ruido, debido a la distorsión causada por los componentes armónicos de la corriente, están muy por encima de los límites establecidos por la regulación ecuatoriana vigente ARCERNNR 002/20 (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020). Una

situación a tener en cuenta cuando estos medios de micromovilidad empiecen a proliferar en la urbe.

Los resultados de esta investigación permiten a los ciudadanos conocer indicadores de interés como la autonomía del vehículo, la energía eléctrica requerida para los traslados y el costo de la energía. Esta información facilitará a los usuarios escoger el modelo y marca de bicicleta eléctrica que le resulte técnica y económicamente más conveniente.

Por otro lado, la evidencia presentada pone a disposición de investigadores, técnicos del sector eléctrico y tomadores de decisiones la caracterización completa del proceso de carga (perfil eléctrico de consumo de energía) de la batería y un análisis de la calidad de la energía. Estos insumos pueden emplearse en procesos de evaluación del impacto que una futura masificación de estos vehículos tendría sobre la red de distribución eléctrica. Disponer de tales insumos brindaría un sustento técnico sólido para el planteamiento de políticas públicas que regulen la calidad de los cargadores de baterías de *e-bikes* y otros vehículos de micromovilidad eléctrica que el país importa actualmente.

En la Figura 1, se presenta una infografía que resume las características técnicas de la *e-bike* analizada y los principales resultados de la investigación.



Figura 1. Infografía sobre la micromovilidad eléctrica en Cuenca.

Contribución de los vehículos eléctricos al mejoramiento de los indicadores de calidad y estabilidad del suministro eléctrico

Los sistemas de generación que emplean energías renovables no convencionales (ERNC), tales como los sistemas solares fotovoltaicos, suponen un desafío técnico al momento de integrarlos en una red eléctrica. La naturaleza intermitente del recurso natural que provee la energía primaria al sistema causa que la potencia generada posea una característica muy variable en el tiempo; como consecuencia, se toma el riesgo de degradar la calidad de la energía del suministro eléctrico y la estabilidad del sistema en su totalidad. En el estudio “Charge Management of Electric Vehicles from Undesired Dynamics in Solar Photovoltaic Generation” (Aguirre et al., 2022), llevado a cabo por la Universidad de Cuenca, Ecuador y la Universidad de Valladolid, España, en el Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca, se realiza una caracterización de la variabilidad de la radiación solar en Cuenca y se propone la utilización de las baterías de vehículos eléctricos, cuando estas están conectadas a la red durante el proceso de carga. Esto con el objetivo de amortiguar las fluctuaciones de potencia, en el punto en el que el sistema de generación solar fotovoltaico del laboratorio evacúa la energía producida a la red de distribución de la compañía que brinda el servicio eléctrico en la ciudad.

El sistema de gestión de energía, implementado por el equipo de investigación, incorpora el sistema de carga de cinco vehículos eléctricos y aplica la técnica de control denominada *ramp-rate*, para reducir los cambios bruscos de la potencia generada por el sistema solar fotovoltaico, los cuales pueden ocurrir en pocos segundos.

La investigación muestra que la radiación solar en Cuenca presenta una elevada variabilidad en periodos de horas, minutos e inclusive segundos, debido a las condiciones meteorológicas propias de las regiones Andinas montañosas, particularmente la nubosidad. Por esto, la planta solar del Laboratorio de Micro-Red puede alcanzar *ramp-rates* que superan el

¹ El término *ramp-rate* es la medida de la rapidez de cambio de la potencia generada por un sistema de generación. Típicamente se expresa como un porcentaje de cambio referido a la potencia nominal del sistema, por minuto. Es utilizado como parámetro de referencia en normativas (en Estados Unidos, y algunos países europeos) que regulan la operación de plantas generadoras como las fotovoltaicas.

53 % de la potencia nominal por minuto (8 kW/min). El sistema propuesto en la investigación, al respaldarse con las baterías de los EVs, permite disminuir, en un 14 %, la tasa de variación de la potencia solar fotovoltaica en el punto de acoplamiento común con la red.

Estos resultados muestran que es posible armonizar la carga de vehículos eléctricos con la generación solar fotovoltaica. Más aún, la implementación de sistemas de gestión de energía como el propuesto en el estudio, contribuye a fomentar la electromovilidad en Cuenca al tiempo de mejorar la calidad de la energía y la confiabilidad del suministro brindado por la red eléctrica al integrarse la generación distribuida renovable.

La infografía de la Figura 2, ilustra los componentes del sistema de gestión de energía e identifica el punto de acoplamiento común en el que convergen el sistema fotovoltaico, la estación de carga, consumidores y la red eléctrica, donde se logra la reducción de las fluctuaciones de potencia.

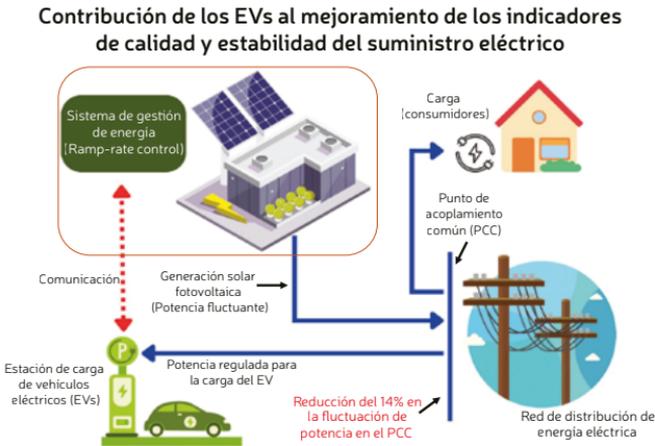


Figura 2. Infografía sobre la contribución de los EVs al mejoramiento de los indicadores de calidad y estabilidad del suministro eléctrico.

Para alcanzar una movilidad sostenible en los centros urbanos es necesario disponer de medios de transporte público que garanticen disponibilidad del servicio, amplia cobertura territorial, calidad, seguridad y bajos niveles de contaminación. En países donde la matriz energética está constituida mayoritariamente por fuentes de energía renovables, la electromovilidad es una opción viable para la consecución de este propósito. Este es el caso de Ecuador en donde el 85,30 % del total de energía eléctrica entregada al servicio público en 2022 provino de fuentes renovables, principalmente hidráulicas (ARCERNNR, 2023).

En el estudio "Public transportation with electric traction: Experiences and challenges in an Andean city" (González et al., 2021) realizado por la Universidad de Cuenca y la Universidad del Azuay, se analiza el desempeño energético de un Bus Eléctrico de Batería (BEB) en su recorrido por una de las rutas de transporte público de Cuenca y la viabilidad técnica de reemplazar toda la flota de autobuses convencionales (424 buses, en 28 rutas) con BEBs.

Entre los principales hallazgos de esta investigación se puede destacar que la eficiencia de un BEB se encuentra en el rango de 0,67–0,94 km/kWh y que esta depende de las condiciones de la ruta recorrida. Durante el proceso de recarga de la batería, los indicadores de calidad de la energía se encuentran dentro de los rangos permitidos por la regulación nacional y el estándar internacional IEEE 519 (IEEE, 2014). Uno de los indicadores más relevantes, a considerar en la etapa de carga de un vehículo eléctrico, es la distorsión armónica total de la corriente (THD-A), el cual, para el caso del BEB bajo estudio resultó ser menor a 4 %. La energía eléctrica diaria requerida para cargar la flota de autobuses de la ciudad, conformada en su totalidad por BEBs, sería de 115 MWh, equivalente al 4 % de la demanda de energía diaria de Cuenca. No obstante, como conclusión de este trabajo se indica que el reemplazo de la flota de autobuses constituye un importante reto tanto para el sistema de distribución de energía eléctrica de la ciudad como para la ciudad misma, ya

que se requiere que la infraestructura urbana provea espacios en donde los autobuses se puedan recargar en horas de la noche. El estudio incluye un análisis sobre las preferencias de los usuarios del BEB respecto al autobús convencional. De aquí se concluye que el 74 % de los usuarios sabía que estaba usando un medio de transporte eléctrico y consideraba que el servicio era mejor, debido a que el autobús no emite gases contaminantes y presenta una importante disminución del ruido; sin embargo, el 56,9 % no estaría de acuerdo en incrementar el costo del servicio. Además, el artículo presenta una alternativa de integración de fuentes renovables de energía (solar fotovoltaica) y sistemas de almacenamiento, para efectos de carga de los BEB.

Los resultados de esta investigación constituyen una referencia para una eventual transición hacia la electromovilidad en el transporte público de Cuenca, ya que provee insumos técnicos concernientes a los requerimientos energéticos necesarios para reemplazar, por completo, la flota existente de autobuses con motores diésel, por una flota de autobuses eléctricos. Con estos parámetros referenciales los tomadores de decisiones pueden analizar la factibilidad técnica y económica que supondría electrificar por completo el transporte público de la ciudad.



Figura 3. Infografía sobre la electromovilidad en el transporte público.

En la Figura 3, se exponen las especificaciones técnicas de los BEBs sujetos de estudio de la investigación, así como también los principales resultados obtenidos.

Impacto de las estaciones de carga rápida de vehículos eléctricos sobre la red de distribución

La electromovilidad, como ya se ha mencionado, es una opción real para lograr una movilidad sostenible en los centros urbanos que requieren aprovechar de forma eficiente las energías renovables no convencionales (ENRC) y garantizar la continuidad y calidad del servicio de energía eléctrica suministrada a los consumidores.

Los usuarios de transporte público y privado requieren de un servicio continuo, el cual está directamente relacionado con el abastecimiento de combustible. Los vehículos con motores de combustión interna (MCI), de gasolina o diésel, requieren de pocos minutos para repostar en las gasolineras. Por el contrario, los vehículos eléctricos (VEs) requieren de tiempos más prolongados para recargar sus baterías con energía eléctrica en las denominadas electrolineras que, por lo general, disponen de estaciones de carga rápida. Las estaciones más rápidas que operan con corriente continua (DCFC, *direct current fast charging* en inglés) tardan entre 20 y 60 minutos para alcanzar el 80 % de la capacidad total de carga de la batería (U.S. Department of Transportation, 2023).

La tecnología sigue avanzando para disminuir los tiempos de recarga, y así satisfacer las exigencias de los usuarios e incrementar la penetración de VEs en el mercado. Sin embargo, desde el punto de vista de la red de distribución de energía eléctrica, es fundamental determinar si la potencia demandada por una o varias DCFC excede la capacidad nominal del alimentador al cual están conectadas. Por esta razón, en el artículo "Impact of EV fast charging stations on the power distribution network of a Latin American intermediate city" (González et al., 2019), se estudia el impacto de la instalación de estaciones de carga rápida

sobre la red de distribución eléctrica de Cuenca.

El estudio concluye que la ciudad requeriría 23 estaciones de carga rápida para brindar servicio a 11 500 VEs, equivalentes a un porcentaje de penetración del 10 % en la zona urbana. Los resultados del estudio revelan que la instalación de esas estaciones ocasiona impactos mínimos sobre los parámetros eléctricos de interés de la red de distribución a nivel de media tensión, tales como caídas de tensión, flujos de potencia en los alimentadores y distorsión armónica total. Esta conclusión es prometedora de cara a promover un uso masivo de medios de electromovilidad eléctrica público y privado al tiempo que se garantiza la disponibilidad de puntos de recarga en diferentes locaciones de la urbe con una afección mínima a la red eléctrica existente.

En la infografía de la Figura 4, se identifican la red de distribución de energía y una estación de carga rápida de vehículos eléctricos. Adicionalmente se listan los principales resultados de la investigación.

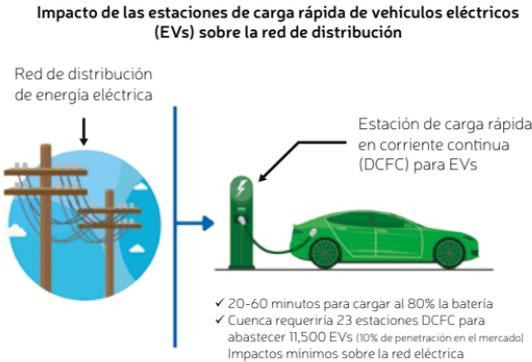


Figura 4. Infografía sobre el impacto de las estaciones de carga rápida de vehículos eléctricos (EVs) sobre la red de distribución.

El elemento químico más abundante del universo es el hidrógeno, y puede producirse en forma gaseosa o líquida. En la actualidad este recurso se aprovecha principalmente como materia prima en procesos industriales, pero también como combustible para sistemas de transporte y calefacción. Además, el hidrógeno puede emplearse como vía de almacenamiento de energía renovable, en cuyo caso toma el nombre de hidrógeno verde (*Green Hydrogen*, en inglés).

Algunos países están comprometidos con la transición global hacia las emisiones netas cero, para lo cual han incorporado en sus políticas públicas planes para la producción y aprovechamiento del hidrógeno. Australia, por ejemplo, en su Declaración Anual de Cambio Climático (DCCEEW, 2022) se comprometió a destinar 71,9 millones de USD de su presupuesto en el periodo octubre 2022-23 para la construcción de un Centro de Hidrógeno (Hydrogen Hub, en inglés) que impulse la industria australiana de hidrógeno verde. Además, el país Oceánico estima una demanda superior a los 3 millones de toneladas anuales de hidrógeno hasta 2040, que representarían aproximadamente 10 billones de USD de ingresos cada año (ARENA, 2023). Por su parte, en 2020, Alemania adoptó la Estrategia Nacional del Hidrógeno (BMWV, 2020) mediante la cual apuesta por el hidrógeno verde para cumplir sus objetivos de protección del medioambiente y mitigación del cambio climático (GTAI, 2023). Esta estrategia está dirigida también hacia el transporte como uno de los mercados estratégicos del futuro. El país europeo considera que la introducción de vehículos con celdas de combustible puede complementar la movilidad eléctrica impulsada por baterías, al tiempo que reduce las emisiones contaminantes.

Con estos antecedentes, investigadores de la Universidad de Cuenca, Ecuador; la Universidad de los Andes, Venezuela, y la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) publicaron el artículo "Hydrogen from hydropower in Ecuador: Use and impacts in the transport sector" (Posso et al., 2015). La investi-

gación se enfoca en determinar el potencial que tienen las centrales hidroeléctricas de Ecuador para producir hidrógeno verde por medio de un proceso de electrólisis² para aprovechar el vertido hidroeléctrico, es decir la energía hidráulica no convertida en electricidad en una central hidroeléctrica (también llamada energía turbinable vertida o STE, por sus siglas en inglés).

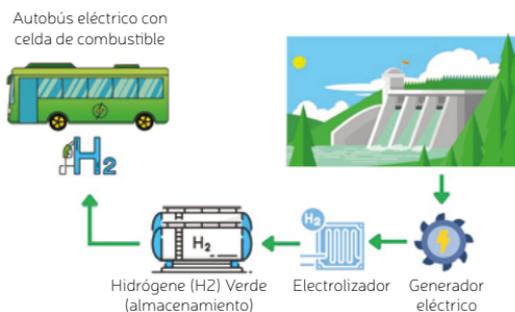
Como parte del artículo, se analiza el uso del hidrógeno en el sistema de transporte público de Cuenca, como comburente de vehículos eléctricos alimentados por celdas de combustible. Investigaciones previas sobre los denominados Sistemas de Energía Solar-Hidrógeno (SHES, por sus siglas en inglés), en los cuales el hidrógeno se emplea como vector energético para almacenar y transportar los excedentes energéticos de centrales solares, concluyen que implementar electrólisis en centrales hidroeléctricas es rentable en países donde este recurso energético es abundante y el costo de producción de la energía es bajo. Este es el caso de Ecuador, en donde cerca del 85 % del total de energía entregada al servicio público en 2022 provino de centrales hidroeléctricas, con un precio medio de la energía vendida por las empresas generadoras de 2,71 centavos de dólar por kWh (ARCERNNR, 2023).

El estudio concluye que el costo de producción de hidrógeno verde para Cuenca, empleando el 100 % del vertido hidroeléctrico disponible en el Complejo Hidroeléctrico Paute-Integral, se estima en USD 1,77/kg en el escenario más favorable. Este valor, a la fecha del estudio, es 0,64 veces el costo real que el Estado paga por el galón de diésel premium importado, que se emplea en los autobuses convencionales que brindan el servicio de transporte público en Cuenca. Aunque la cantidad de hidrógeno a ser producido no cubriría la totalidad de la demanda energética que requeriría una flota completa de autobuses impulsados por celda de combustible, los resultados del estudio muestran que el uso de hidrógeno en el transporte público de la ciudad puede ser económicamente competitivo. Esto sin olvidar que el aprovechamiento del hidrógeno verde no conlleva impactos ambientales y sociales negativos, como aquellos asociados a la explotación energética basada en el uso de los combustibles de origen fósil.

1 Electrólisis es el proceso mediante el cual una corriente eléctrica se hace circular por agua para separar el hidrógeno del oxígeno (EPA, 2023).

La Figura 5, ilustra el proceso de producción de hidrógeno en una central hidroeléctrica y su aprovechamiento en un bus eléctrico con pila de combustible para el transporte público.

El Hidrógeno en la electromovilidad



Producción de hidrógeno (H₂) verde con la energía turbinable vertida (STE) y electrólisis
Costo de producción de H₂ verde: USD 1,77 /kg **0,64 veces el costo del diésel importado**

Figura 5. Infografía sobre el hidrógeno en la electromovilidad

Conclusiones

La electrificación del transporte público y privado es técnicamente posible en el Ecuador ya que la matriz energética del país es mayoritariamente renovable. Se podría dar siempre que exista la planificación adecuada y la inversión económica para implementar la infraestructura complementaria que permita asegurar la operatividad, calidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica a los consumidores.

Particularmente en Cuenca, es técnicamente factible reemplazar la flota completa de autobuses de transporte público tradicionales, basados en motores diésel, por autobuses eléctricos de batería, para lo cual diariamente se necesitaría una cantidad de energía equivalente al 4 % de la demanda energética

diaria de la ciudad y la infraestructura de parqueo para que la flota recargue baterías en horas de la noche.

Por otro lado, el aprovechamiento del 100 % de la energía turbinable vertida (STE) de las centrales hidroeléctricas del Complejo Hidroeléctrico Paute-Integral, permitiría producir hidrógeno “verde” para abastecer parcialmente la flota completa de transporte público de Cuenca, si esta estuviese constituida por autobuses con pila de combustible. La producción del hidrógeno tendría un costo de USD 1,77/kg, que es equivalente a 0,64 veces el costo del diésel que el Ecuador importa para la operación de los autobuses con motores de combustión interna.

Finalmente, el Plan de Electromovilidad de Cuenca (CITIES FORUM, y C&M Consultores, 2023) se vería fortalecido impulsando el uso de bicicletas eléctricas, de modo que los ciudadanos puedan recorrer largas distancias a través de las ciclovías existentes que conectan puntos estratégicos. Asimismo, la implementación de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos fomentaría su utilización entre la ciudadanía, sin causar mayores problemas a las redes eléctricas considerando un incremento progresivo en el porcentaje de penetración de vehículos eléctricos al parque automotor de Cuenca. Además, incorporando sistemas de gestión de carga con técnicas de control como la denominada *ramp-rate* es posible reducir las fluctuaciones de potencia causadas por sistemas de generación distribuida como los solares fotovoltaicos y eólicos.

Referencias

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Regulación No. ARCERNNR – 002/20 Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica.*

Aguirre, I., Dávila-Sacoto, M., González, L. G., Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, Ó., Zorita-Lamadrid, Á. L., y Espinoza, J. L. (2022). Charge Management of Electric Vehicles from Undesired Dynamics in Solar Photovoltaic Generation. *Applied Sciences* 2022, 12(12), 6246. <https://doi.org/10.3390/AP12126246>

ARCERNNR. (2023). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2022*.

ARENA. (2023). Hydrogen energy - Australian Renewable Energy Agency (ARENA). Australian Renewable Energy Agency. t.ly/NRRO

Barragán-Escandón, A., Zalamea-León, E., y Terrados-Cepeda, J. (2019). Incidence of Photovoltaics in Cities Based on Indicators of Occupancy and Urban Sustainability. *Energies*, 12(5), 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en12050810>

BMWl. (2020). *The National Hydrogen Strategy*. www.bmwi.de

DCCEEW. (2022). *Annual Climate Change Statement 2022*. Australian Government - Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. t.ly/NBfK

EMOV EP, y GAD Municipal de Cuenca. (2019). *Bici Pública Cuenca - Bicicletas compartidas Cuenca*. Bici Pública Cuenca. t.ly/jp2R

EPA. (2023). *A Glimpse into Hydrogen & Transportation | US EPA*. United States Environmental Protection Agency. t.ly/dLOOY

González, L. G., Cordero-Moreno, D., y Espinoza, J. L. (2021). Public transportation with electric traction: Experiences and challenges in an Andean city. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 141. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110768>

González, L. G., Siavichay, E., y Espinoza, J. L. (2019). Impact of EV fast charging stations on the power distribution network of a Latin American intermediate city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 309–318. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.03.017>

GTAI. (2023). *Green Hydrogen*. Germany Trade & Invest. t.ly/ANar

IEEE. (2014). *IEEE SA - IEEE 519-2014*. <https://standards.ieee.org/ieee/519/3710/>

Ñíguez-Morán, V. I., Villa-Ávila, E., Ochoa-Correa, D., Larco-Barros, C., y Sempértegui-Álvarez, R. (2023). Study of the Energy Efficiency of an Urban E-Bike Charged with a Standalone Photovoltaic Solar Charging Station and its Compliance with the Ecuadorian Grid Code No. ARCERNR – 002/20. *Ingenius*, (29), 46–57. <https://doi.org/10.17163/INGS.N29.2023.04>

Posso, F., Espinoza, J. L., Sánchez, J., y Zalamea, J. (2015). Hydrogen from hydropower in Ecuador: Use and impacts in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(45), 15432–15447. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.08.109>

Sánchez Mendieta, C. (2022). *Prevén ampliar red de ciclovías en Cuenca - Diario El Mercurio*. *Prevén Ampliar Red de Ciclovías En Cuenca*. t.ly/M1_f

CITIES FORUM, y C&M Consultores. (2023). *Plan de electromovilidad de Cuenca*. <https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2023/07/E-Cuenca.pdf>

U.S. Department of Transportation. (2023). *Electric Vehicle Charging Speeds*. *US Department of Transportation*. t.ly/OGwOB



La transición a la electromovilidad: una perspectiva técnico-eléctrica

Diego Morales Jadán:  0000-0002-4382-5219

Marco Toledo Orozco:  0000-0001-6570-850X

Javier Cabrera Mejía:  0000-0003-2027-0211

¹ Universidad Católica de Cuenca, Ingeniería Eléctrica

² Universidad Politécnica de Valencia- España,
Instituto de Ingeniería Energética

Puntos clave

- Este capítulo presenta de una manera sintética los resultados obtenidos de la investigación de los autores en los últimos años con respecto a la movilidad eléctrica desde un enfoque netamente eléctrico.
- Los resultados obedecen a la realidad de Cuenca y consideran su topología y particularidades de movilidad; para este caso se evidencia reducción en la autonomía de los vehículos eléctricos, posibilidad de implementar estaciones de carga rápida y uso de la infraestructura tranviaria.

173

Introducción

Cuenca está ubicada en la cordillera de los Andes, en la región occidental de América del Sur, a una altura de entre los 1 800 y 3 600 metros sobre el nivel del mar, es considerada ciudad intermedia por su tamaño y población, cuenta con 600 mil habitantes y una superficie aproximada de 3 086 km² con irregularidad topológica; además, tiene alrededor de 102 000 vehículos

matriculados con corte al 2020, lo que significa que circula un vehículo por cada 4 habitantes.

En el 2013, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable comisionó un estudio para establecer zonas pilotos para el despliegue de redes eléctricas inteligentes. Una de estas zonas fue Cuenca, en donde se analizó la posibilidad de implementar vehículos eléctricos a una escala masiva (Álvarez-Bel et al., 2016). A partir de ese estudio se evidenció la importancia de que las grandes urbes como Cuenca inicien el proceso de transición hacia la movilidad eléctrica.

Los retos principales en esta transición generalmente son los referentes a la topología de la ciudad, el nivel de emisiones de CO₂ originadas por vehículos a combustión interna, falta de infraestructura de carga para vehículos y autobuses eléctricos, falta de soporte técnico en talleres autorizados, precio y desconocimiento de la población.

Estos desafíos no son ajenos a Cuenca, en este sentido la línea principal de investigación de los autores se ha centrado en determinar los impactos de las posibles soluciones para promover y fortalecer el uso de movilidad eléctrica. A continuación, se presentan los principales resultados de la simulación del sistema tranviario, desarrollo de sistemas eléctricos autónomos para emprendimientos móviles y análisis de eficiencia e implementación de estaciones de carga.

Energía autónoma para empresas que requieren movilidad o están fuera del alcance de la red eléctrica pública

En Icaza et al. (2018) describimos una aplicación eléctrica para emprendimientos portables en Cuenca, en especial los puestos móviles de comida rápida, que al no disponer de energía eléctrica son dependientes del uso de gas licuado. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar y un banco de baterías permitirían el manejo de una estufa eléctrica implementada en un vehículo sencillo para reducir el peso que involucra una bombo-

na de gas, así como cargas necesarias de licuadoras, iluminación, radio, entre otros.

Para el diseño propusimos un sistema de respaldo de baterías que almacena el exceso de energía que pasa por la carga, además de un controlador de carga que protege la batería en los procesos de descarga y sobrecarga. En el modelado utilizamos datos meteorológicos multivariados de la estación fija, estos permiten plantear una propuesta técnica del uso adecuado de energías renovables, lo que demuestra la viabilidad de la idea.

Modelado del Tranvía Citadis-302 implementado en Cuenca utilizando Matlab-Simulink

El tranvía de Cuenca fue propuesto como una respuesta ante la congestión y contaminación ambiental. La longitud del trazado es de 10,7 km en cada sentido, con una velocidad promedio de 22km/h, con un tiempo aproximado de 35 minutos para recorrer las veinte y siete estaciones. Cada unidad puede transportar hasta trescientos pasajeros. Debido a que parte del recorrido atraviesa área patrimonial de la ciudad se consideró: i) reducir el impacto visual sustituyendo líneas aéreas por el sistema de alimentación por el suelo (APS), ii) reducir las vibraciones que podrían afectar las edificaciones de Centro Histórico mediante una malla antivibratoria en los basamentos del trayecto. La alimentación al vagón se realiza por medio de líneas a 700 Vcc, dentro de la unidad se alimentan las baterías de respaldo que en caso de una falla en la alimentación permiten a la unidad llegar hasta la siguiente parada. El sistema cuenta con cinco subestaciones rectificadoras (S/Er) y una de cocheras, alimentada con circuitos dobles de 22kV desde las subestaciones S/E-5 y S/E-4 de la Empresa Eléctrica Centro Sur.

En el estudio publicado en Medina et al. (2016) presentamos una modelización del comportamiento eléctrico del sistema tranviario de Cuenca antes de que entrara en operación en el 2020.

La potencia modelada aparente media consumida es de 1,65 MVA al inicio de operaciones y de 2,15 MVA en el escenario horizonte con un factor de aproximadamente 0,95 de potencia. Su tarifación está dentro de la categoría general, grupo media tensión con demanda horaria para entidades oficiales con los siguientes rubros: i) energía activa 0,061 USD/kWh de 07:00 a 22:00 y 0,049 USD/kWh de 22:00 a 07:00, ii) tarifa por demanda 4,576 USD/kWh y, iii) tarifa por comercialización 1 414 USD.

Aplicando los resultados del presente estudio se logró reducir el valor de la tarifa en el sistema tranviario.

Eficiencia en la autonomía de vehículos eléctricos en ciudades topológicamente irregulares Caso de estudio Cuenca

En Toledo, Torres, Alvarez, y Morales (2020), y Morales, Besanger, Toledo, y Medina (2016) estudiamos los patrones de movilidad de los cuencanos través del levantamiento de información mediante la aplicación de una encuesta sobre una muestra representativa. Los encuestados fueron mayores de edad que poseían vehículos a combustión interna, y mayores de edad con trabajo y capacidad financiera para comprar un vehículo, con el objetivo de determinar la eficiencia de los vehículos eléctricos (VE) versus vehículos de combustión interna en función de la topología de la ciudad a fin de estimar el número de recargas y su costo. Empleamos datos de carga y descarga de las baterías de los vehículos eléctricos para determinar la cantidad de recargas mensuales al utilizar rutas habituales con variables como la velocidad promedio (37 km/h), la congestión del tráfico y la topología de la ciudad. Los vehículos eléctricos con los que se realizaron las pruebas tienen una autonomía de 124 km (año 2019). Al comparar los datos técnicos de los fabricantes de los VE con los resultados obtenidos de los recorridos en la ciudad, obtuvimos una eficiencia en la autonomía media del 67 %. La altitud, la condición topológica de la ciudad y el modo de conducción influyen mucho en la autonomía de las baterías de los VE.

Se determinó que el índice de motorización de la ciudad fue superior a 200 vehículos por cada mil habitantes en el 2020. El inadecuado sistema de transporte público de la ciudad hace que el 32 % de la población utilice vehículos particulares; de este valor, el 66 % de los ciudadanos utilizan sus vehículos con recorridos entre 3 km y 10 km. Únicamente el 19 % de los ciudadanos encuestados está dispuesto a adquirir un EV, mientras que el resto no tiene conocimiento de la tecnología asociada al mantenimiento.

Método para mejorar el sistema de baterías de un sistema de tracción eléctrico de potencia media

En el estudio publicado en Fernandez, Cordero, y Morales (2022) detectamos que el principal problema para la implementación de movilidad eléctrica en Ecuador es la reducción de la autonomía, debido principalmente a las condiciones geográficas del país. Los vehículos eléctricos no tienen el mismo rendimiento energético en ciudades que están a nivel del mar y ciudades de montaña que se ubican a más de 2 000 metros de altura y que presentan perfiles cambiantes en sus calles y avenidas.

Esa investigación entrega dos contribuciones importantes: la primera, es un proceso de caracterización de vehículos eléctricos que permite identificar las posibles mejoras en los diferentes elementos que forma parte del sistema de tracción eléctrica; la segunda, es una metodología para un proceso de optimización del material de las baterías para mejorar la autonomía y reducir el peso.

Para ese estudio seleccionamos baterías de hidruro metálico de níquel (NiHm), que son utilizadas en vehículos híbridos presentes en el mercado local. Estas baterías se caracterizan por ser simples y compactas, y consiguen un ahorro de espacio del 15 % en volumen cúbico y un ahorro de peso de aproximadamente un 25 % respecto de otros módulos de batería conven-

cionales. El peso total del vehículo utilizado para pruebas fue de 1 050 kg, incluyendo las 5 baterías de plomo originales, más el peso estimado de 4 ocupantes equivalente a 300 kg. Para analizar la autonomía seleccionamos 4 rutas: dos rutas cortas de 3,7 km y 6 km, y dos rutas largas de 14 km y 31,2 km. Los resultados mostraron que el comportamiento de las baterías de NiHm en estas rutas fue superior al de las baterías de plomo, sobre todo en distancias mayores.

Metodología para determinar la gestión de la demanda en la recarga de vehículos eléctricos en mercados verticalmente integrados a través de generación solar fotovoltaica

En los estudios de Toledo-Orozco et al. (2022) y Morales, Besanger, Sami, y Alvarez Bel (2017) presentamos una metodología de gestión de la demanda basada en el modelo “Autoprodutor” para la recarga de vehículos eléctricos a través de la optimización de los costos de recarga, considerando la variabilidad de la radiación solar, patrones de movilidad vehicular, preferencias del consumidor y ubicación óptima de las estaciones de carga (Figura 1). Para el estudio utilizamos datos reales de vehículos eléctricos, redes de distribución y encuestas realizadas en una muestra representativa en la ciudad de Cuenca.

En las encuestas encontramos que entre los factores percibidos por los potenciales usuarios que impiden una introducción masiva de los VE en el parque vehicular se encuentran la poca o nula disponibilidad de puntos de carga (a la fecha del estudio existían dos puntos públicos), además del desconocimiento y la escasa información financiera y tecnológica que implica la sustitución de un vehículo de combustión interna frente a un vehículo eléctrico. Encontramos también que el 70 % de la población está interesada en recargar un VE en puntos de recarga públicos.

El modelo de gestión propuesto reduciría los picos de demanda de energía y mitigaría el impacto económico y técnico

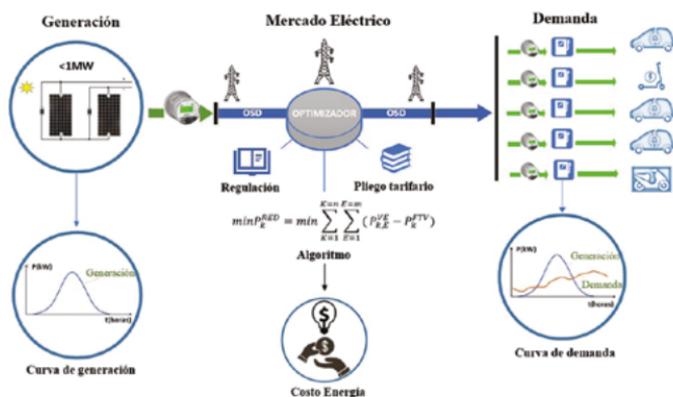


Figura 1. Metodología para la optimización de la demanda a través de generación solar fotovoltaica.

en las redes de distribución. El uso de la energía solar fotovoltaica para abastecer la demanda en las estaciones de recarga de vehículos eléctricos supone un impacto positivo en el medio ambiente al ser energía renovable. La cadena productiva desde la generación hasta el consumo cierra el ciclo en la matriz energética con una importante reducción de las emisiones de CO₂.

Evaluación metodológica para integrar estaciones de carga para vehículos eléctricos en un sistema de tranvía utilizando OpenDSS Un estudio de caso en Ecuador

En esta investigación Toledo-Orozco, Bravo-Padilla, Álvarez-Bel, Morales-Jadan, & Gonzalez-Morales (2023) propusimos una metodología novedosa para integrar vehículos eléctricos y autobuses eléctricos (BEs) y optimizar la infraestructura tranviaria, mitigando el impacto en la red de distribución en tres escenarios de operación: el primero en carga lenta, el segundo en carga rápida y un tercer escenario que combina los dos escenarios anteriores (Figura 2).

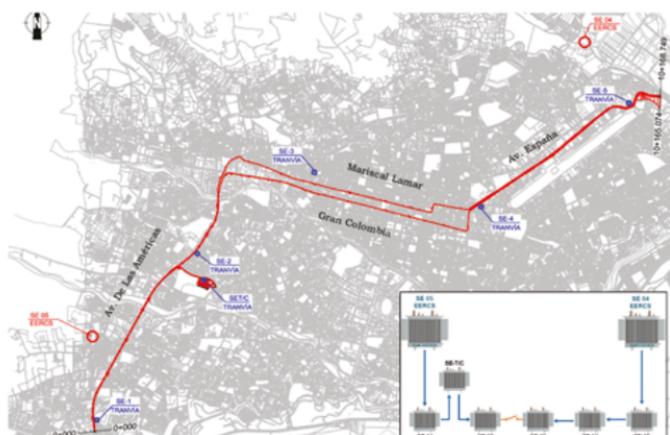


Figura 2. Propuesta metodológica para la determinación de los impactos generados en la red tranviaria por la incorporación de estaciones de carga para EVs y BEs.

Las simulaciones determinaron que la carga lenta nocturna representaría el 9 % de la flota total de autobuses, con una mejora del factor de utilización del sistema tranviario del 11 % al 32 %, mientras que la carga rápida y combinada de vehículos y autobuses no es factible debido al aumento de pérdidas en el sistema por sobrecarga en la red; sin embargo, el estudio valida la penetración de determinadas estaciones de carga en la red tranviaria en un caso real.

El sistema tranvía de Cuenca permitiría entonces la incorporación de estaciones de carga en su red para aprovechar los 2,40 MW disponibles, cuyo factor de aprovechamiento en estas condiciones de operación es del 11 %. Se podría incluir una flota de hasta 42 buses eléctricos, lo que representa el 9 % del sistema de transporte público de buses actual de la ciudad y el 32 % de incremento del factor de utilización de la red, manteniendo los parámetros eléctricos dentro de los límites establecidos en la norma y con pérdidas de potencia aceptables.

Desarrollo de corredores de carga de vehículos eléctricos para autopistas de gran elevación

Caso de estudio: Cuenca-Ecuador

Finalmente, presentamos un estudio que aporta a solventar los problemas identificados en las previas investigaciones y en las necesidades de los habitantes del austro ecuatoriano referentes a la falta de puntos de carga, mediante la propuesta de la primera ruta de la electromovilidad entre las ciudades de Cuenca y Guayaquil (Davila-Sacoto, Toledo, Hernández-Callejo, González, y Bel, 2022). Esta investigación se basó en el uso y nivel de penetración de la tecnología, analizó el plan de movilidad de la ciudad, y utilizó mediciones en tiempo real de descarga de baterías, monitoreo de altitud a través de GPS, registros del panel de control de vehículos eléctricos, encuestas y la tarifa eléctrica vigente.

Se implementaron cuatro estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos garantizando la libre movilidad eléctrica entre las provincias de Azuay, Cañar y Guayas a través de un corredor energético en diferentes zonas de influencia que potencian su desarrollo en sectores como:

- El edificio matriz de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, en Cuenca. Instalada y puesta en operación el 12 de abril de 2022.
- En la parroquia Molleturo, específicamente en la vía Cuenca, Cajas–Puerto Inca, de manera que se integre con la provincia del Guayas. En operación desde julio 2022.
- En la provincia de Cañar, en las instalaciones de la nueva subestación de CENTROSUR. En operación desde julio 2022.
- En el centro de Cuenca, junto al río Tomebamba, en el campus de la Universidad de Cuenca, para articular estudios de investigación entre la academia y la empresa pública.

Futuras investigaciones en el corto plazo generarán resultados que esperamos permitan un fortalecimiento real en la implementación de vehículos eléctricos en la región.

Referencias

Dávila-Sacoto, M., Toledo, M. A., Hernández-Callejo, L., González, L. G., y Bel, C. A. (2022). *Development of Electric Vehicles Charging Corridors for Steep Elevation Highways. Case study: Cuenca-Ecuador*. ICSC Cities, Cuenca.

Fernández, E., Cordero, D., y Morales, D. (2022). *Method for Improving Battery System of the Medium Power Electric Traction System*. IEEE ANDESCON.

Icaza, D., Morales, D. X., Morocho, C., Díaz, J., Pando, J., y Correa, J. (2018). *Autonomous Energy for Undertakings that Require Mobility or are Beyond the Reach of the Public Electricity Network*. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA).

Morales, D. X., Besanger, Y., Sami, S., y Álvarez Bel, C. (2017). Assessment of the impact of intelligent DSM methods in the Galapagos Islands toward a Smart Grid. *Electric Power Systems Research*, 146, 308-320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.003>

Morales, D. X., Besanger, Y., Toledo, M., y Medina, R. D. (2016). *Impact study of new loads and time of use schedule in the low voltage network*. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe).

Toledo-Orozco, M., Bravo-Padilla, E., Álvarez-Bel, C., Morales-Jadan, D., y González-Morales, L. (2023). Methodological Evaluation to Integrate Charging Stations for Electric Vehicles in a Tram System Using OpenDSS—A Case Study in Ecuador. *Sustainability*, 15(8), 6382.

Toledo-Orozco, M., Martínez, L., Quito, H., Quizhpi, F., Álvarez-Bel, C., y Morales, D. (2022). Methodology to Determine the Management of Demand in Recharging Electric Vehicles in Vertically Integrated Markets Includes Photovoltaic Solar Generation. *Energies*, 15(24), 9590.

Toledo, M. A., Torres, S. P., Álvarez, C., y Morales, D. X. (2020). *Energy Autonomy of Electric Vehicles in Topologically Irregular Cities: Case Study Cuenca - Ecuador*. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA).

Al estudiar la movilidad urbana se puede aprender mucho sobre una ciudad, hablamos de la capacidad de planificación, de la importancia que se da al espacio público y al ambiente, de las inequidades sociales, de la salud de la población; a partir de esto podríamos afirmar: “Dime cómo te mueves y te diré que tipo de ciudad eres”.

ISBN: 978-9978-14-546-3



UCUENCA

