

Advanced Eco-Routing Planning Tool: herramienta de planificación de rutas en Ciudades Inteligentes

José R. Lozano-Pinilla¹, Iván Sánchez-Cordero², and
Cristina Vicente-Chicote¹

¹ Quercus SEG, Universidad de Extremadura, Cáceres, Spain
{[joserrealp](mailto:joserrealp@unex.es), [cristinav](mailto:cristinav@unex.es)}@unex.es

² TRANSyT, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain
ivan.sanchezcor@upm.es

Resumen El uso de servicios de planificación de rutas ha aumentado considerablemente en los últimos años. Mientras que la mayoría de estos servicios ofrecen a sus usuarios la ruta más corta o la más rápida para un determinado viaje, sólo unos pocos proporcionan información sobre la ruta más ecológica. El *eco-routing* ha demostrado potencial para reducir significativamente tanto el consumo de combustible como las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones que ofrecen eco-rutas, no tienen en cuenta para su cálculo aspectos como las características específicas del vehículo en el que se viaja, la topografía del terreno o las condiciones del tráfico. De hecho, no suelen ofrecer una estimación del consumo de combustible/energía para cada ruta, sino una aproximación porcentual del ahorro que podría obtenerse al elegir la eco-ruta frente a las rutas alternativas. En este trabajo se presenta **AdEcoRPT** (*Advanced Eco-Routing Planning Tool*): un framework de planificación de rutas que permite obtener la ruta más rápida, la más corta y la más ecológica ofreciendo, además, estimaciones precisas del consumo de energía/combustible para cada una de ellas.

Keywords: Estimación precisa del consumo de energía/combustible · Eco-Rutas · Ciudades Inteligentes

1. Introducción

Hace una décadas, la única forma de planificar un viaje con vehículos rodados, era mediante mapas físicos de las carreteras, los cuales puede que no representaran correctamente el estado actual de las carreteras. Sin embargo, con la llegada de los dispositivos móviles y la aparición de los sistemas de navegación, la planificación de viajes y rutas en vehículos ha cambiado totalmente, facilitando así su uso y aplicabilidad.

Actualmente, estos sistemas de navegación se encuentran disponibles tanto en los dispositivos móviles como en los propios vehículos, y han mejorado notablemente en los últimos años, ofreciendo información de gran valor para el

usuario final. De hecho estos sistemas cada vez poseen más características que promueven la movilidad inteligente, incluyendo la planificación de rutas ecológicas, la monitorización del tráfico en tiempo real, y la provisión de información sobre incidentes viales, entre otros. Estas características no solo facilitan la planificación de viajes, sino que también permiten obtener información de valor que puede ser usada por otros sistemas en Ciudades Inteligentes (*Smart Cities*).

Una de las aplicaciones de navegación más utilizadas actualmente es Google Maps que ofrece, de forma gratuita, muchas de las funcionalidades antes mencionadas. En los últimos años, esta aplicación ha incorporado una característica innovadora frente a sus competidores: la posibilidad de seleccionar la ruta más eco-eficiente, término asociado al *eco-routing*, definido por Ericsson et al. [1].

El objetivo del *eco-routing* es calcular la ruta que minimiza la energía necesaria para completar un viaje, teniendo en cuenta diversos factores como el estado actual del tráfico, la topología de la carretera (por ejemplo, pendiente, tipo de carretera, desvíos, etc.) y las características específicas del vehículo (por ejemplo, peso, tipo de combustible, etc.). La reducción del consumo de energía de los vehículos no solo implica una disminución del coste del viaje, sino también una reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). A pesar de sus ventajas, las eco-rutas suelen implicar tiempos de viaje más largos, ya que pueden considerar carreteras con menos pendiente que pueden requerir recorrer una mayor distancia. De hecho, un estudio realizado en Japón por Kono et al. [2] concluyó que las eco-rutas, en comparación con las rutas más cortas, reducen el consumo de combustible en aproximadamente un 9%, pero también aumentan el tiempo de viaje en un 9%. A pesar de los tiempos de viaje más largos, Zeng et al. [3,4] destacan diferentes beneficios de realizar eco-rutas en comparación con rutas más cortas o más rápidas.

El cálculo de eco-rutas es un proceso computacionalmente muy costoso, que implica gestionar grandes volúmenes de datos. En este contexto, el framework **AdEcoRPT** (*Advanced Eco-Routing Planning Tool*), presentado en este trabajo, tiene como objetivo calcular rutas de viaje (incluidas las eco-rutas) y su coste asociado (en términos de energía/combustible) de una manera precisa y eficiente, utilizando diversas fuentes de información y preservando la privacidad de los usuarios. De este modo, dado un destino, el framework ofrece a los usuarios la ruta más rápida, la más corta y la más eco-eficiente, ofreciéndoles una estimación ajustada sobre la distancia, el tiempo de viaje y el consumo asociado a cada una de ellas, para que así puedan elegir, de manera informada, la que más les conviene en función de sus preferencias o necesidades.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, la sección 2 realiza una revisión de los trabajos relacionados con *eco-routing*. A continuación, la sección 3 detalla la arquitectura de la aplicación web propuesta, describiendo sus componentes principales y la interacción entre ellos. Posteriormente, en la sección 4 se explica cómo se adquiere, procesa y utiliza la información de la topología de las carreteras para calcular las eco-rutas. A continuación se muestra el workflow detallado en la sección 5. Finalmente, la sección 6 sintetiza las conclusiones y esboza posibles trabajos futuros.

2. Trabajos relacionados

El *eco-routing* es actualmente un área de investigación de gran interés debido a su relevancia en el contexto de la movilidad inteligente, uno de los pilares fundamentales de las Ciudades Inteligentes. La movilidad inteligente aspira a optimizar la eficiencia del transporte mediante la reducción de los tiempos de viaje y la congestión, la mejora de la gestión de transporte y el tráfico, la prevención de accidentes y la promoción de la sostenibilidad. Estos objetivos se alinean con los principios de las Ciudades Inteligentes, que buscan mejorar la calidad de vida de sus habitantes a través de la integración de tecnología y servicios urbanos.

Existen diferentes trabajos de investigación centrados en el *eco-routing*. Zeng et al. [5] desarrollaron un algoritmo para sistemas de navegación que identifica la ruta con el consumo mínimo de combustible teniendo en cuenta requisitos de tiempo. Aguiar et al. [6] presentaron MobiWise, un sistema de apoyo a la toma de decisiones de eco-rutas que se beneficia de las tecnologías del *Internet of Things* (IoT), datos de tráfico en tiempo real y un gemelo digital (*digital twin*), diseñado para una ciudad de tamaño medio como Oporto (Portugal). Por otro lado, en relación con la reducción de emisiones y contaminación del aire, Vamshi et al. [7] propusieron un algoritmo de planificación de rutas dinámico que distribuye la densidad de tráfico en tiempo real hacia áreas con baja concentración; mientras que Ghaffari et al. [8] introdujeron un algoritmo para encontrar la ruta más corta basada en la congestión del tráfico y la calidad del aire.

En relación con los sistemas de navegación actuales que admiten el cálculo de eco-rutas, cabe destacar principalmente a Google Maps [9], aunque cada vez son más los sistemas trabajando en su implementación. Esta funcionalidad se encuentra disponible en una gran cantidad de países, más de 40 en Europa [10], aunque no en todos. Esta aplicación permite a los conductores configurar el tipo de motor de sus vehículos y, en función de este, muestra la eco-ruta calculada y una estimación aproximada del ahorro de combustible. Sin embargo, las eco-rutas propuestas por Google Maps parecen no tener en cuenta factores como cambios notables en la pendiente en la ruta, lo que afecta significativamente al consumo de energía del vehículo y, por lo tanto, de combustible.

A pesar de los progresos realizados en el campo del *eco-routing*, la mayoría de los estudios revisados presentan limitaciones significativas, ya sea en las áreas geográficas de aplicación, en las tecnologías necesarias para su implementación, o en la información incompleta que se utiliza para los cálculos. En respuesta a estas limitaciones, nuestra propuesta se centra en abordar el cálculo de eco-rutas a nivel mundial, utilizando tecnologías actualmente disponibles e información topológica precisa. Este enfoque tiene como objetivo superar las limitaciones existentes y proporcionar una solución más robusta y sencilla de aplicar para el *eco-routing*. Al hacerlo, buscamos contribuir significativamente a la movilidad inteligente y a la sostenibilidad en las ciudades de todo el mundo.

3. Arquitectura

La arquitectura de *AdEcoRPT*, ilustrada en la Figura 1, se conforma de varios componentes que se despliegan y se interconectan entre sí con un bajo nivel de acoplamiento. Esto facilita que dichos componentes sean fácilmente reemplazables por otros similares. A continuación, se describen cada uno de estos componentes, indicando su funcionalidad y las tecnologías utilizadas.

- **Servicios de planificación de rutas (*Routing Services, RS*):** se encarga de recopilar la información relacionada con las rutas desde un conjunto de coordenadas, a través de diferentes servicios ya sean propios o de terceros. Actualmente, los servicios de planificación de rutas de terceros soportados son: (1) OpenRouteService [11] (ORS); (2) Open Source Routing Machine [12,13] (OSRM); y (3) GraphHopper [14,15]. A pesar de que estos servicios se encuentran disponibles a través de sus APIs oficiales, algunos de ellos han sido desplegados localmente utilizando contenedores Docker para mejorar su eficiencia y ajustarlo a las necesidades del sistema. Además, este componente ha sido diseñado para ser extensible, lo que significa que podría soportar fácilmente otros servicios de cálculo de rutas.
- **Servicio de topología (*Topology Service, TS*):** permite obtener información relacionada con la altitud de los diferentes puntos de una ruta, la cual se utilizará posteriormente para calcular las pendientes de las mismas. La precisión de este servicio afectará directamente a la estimación de consumo, ya que los cambios de pendientes son uno de los factores que más le afectan. En este caso, el servicio de terceros utilizado es OpenTopoData [16], el cual ha sido desplegado localmente con el conjunto de datos requerido por el sistema. El procedimiento de carga y procesamiento de datos geoespaciales y de la topología se describe en detalle más adelante.

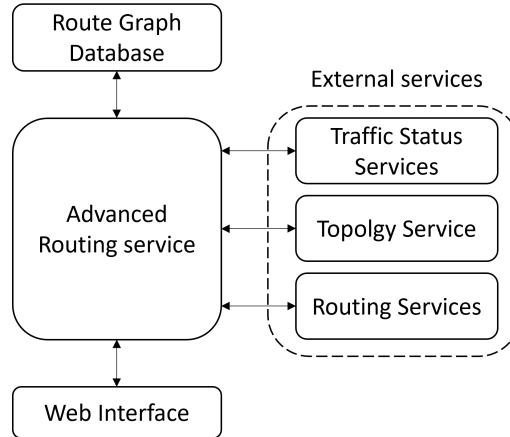


Figura 1: Arquitectura de AdEcoRPT

- **Interfaz web (*Web Interface, WI*):** actúa como la interfaz del sistema completo, ver Figura 2, permitiendo a los usuarios seleccionar los puntos de origen y destino de la ruta que desean realizar, mostrando también las posibles rutas entre ellos. Además, permite obtener información más detallada de cada una de ellas como por ejemplo la distancia, el tiempo de viaje o el consumo de combustible estimado. Opcionalmente, si se encuentran disponibles, ofrece indicaciones paso a paso para realizar dicha ruta. Las tecnologías involucradas en su desarrollo son Python, Flask, Jinja y OpenStreetMap.
- **Base de datos de rutas en grafo (*Route Graph Database, RDG*):** este componente se encarga de representar y almacenar las rutas en grafos, por segmentos, de tal forma que se podrán aplicar posteriormente diferentes algoritmos de optimización. En este caso, la base de datos utilizada es Neo4j.
- **Servicio de estado de tráfico (*Traffic Status Service, TSS*):** debido a que el estado del tráfico también afecta al consumo de combustible en una ruta, será necesario incorporarlo a la hora de estimar las eco-rutas. En el sistema propuesto, el servicio de tráfico utilizado es el proporcionado por MapBox [17], que ofrece datos de congestión de tráfico en tiempo real.
- **Servicio avanzado de planificación de rutas (*Advanced Routing Service, ARS*):** se trata del componente principal de *AdEcoRPT*. Es el responsable de procesar la información de entrada del usuario, obtener las posibles rutas (usando RS), procesarlas, almacenarlas (en el RDG) y ofrecerlas visualmente al usuario (a través del WI). La principal funcionalidad es el procesamiento de las rutas, el cual consiste en los siguientes pasos: (1) recuperar las rutas completas; (2) segmentarlas en tramos; (3) obtener información de la topología (velocidad máxima, pendientes, ...) y de la congestión del tráfico para estos tramos; y (4) realizar estimaciones de consumo para cada ruta. Este componente se ha desarrollado en Python, junto con varias bibliotecas y paquetes adicionales.

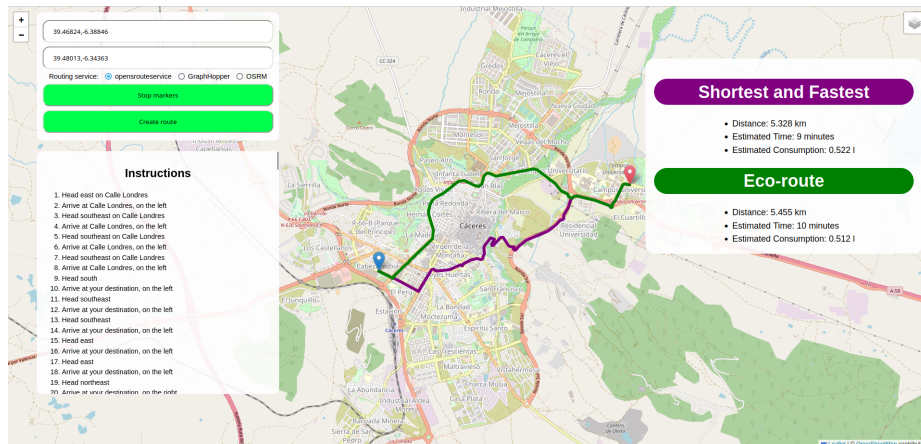


Figura 2: Ejemplo de rutas en la interfaz web

Debido a que algunos de los servicios externos han sido desplegados de forma local, el uso de Docker y Docker-Compose se ha incorporado a este sistema. En esta línea, se ha utilizado el *Lenguaje de Modelado de Contenedores (CML)* [18], desarrollado por los autores del presente trabajo, para definir la arquitectura de los componentes locales junto con sus propiedades, relaciones y almacenes (volúmenes) de datos. Además, en el sistema propuesto también se tienen en cuenta las limitaciones del despliegue local de estos componentes, tales como que algunos servicios de planificación de rutas no ofrecen todas las características de las versiones en línea, realizando los ajustes necesarios para que no afecte al funcionamiento global.

4. Información de la topología

La información de la topología es muy valiosa a la hora de calcular el consumo asociado a una ruta, debido a que los cambios bruscos de pendientes afectan considerablemente tanto al consumo de combustible como a las emisiones. Es por ello, que la precisión de la misma es de vital importancia.

En este sistema, para obtener esta información se utiliza el componente TS, que usa OpenTopoData de forma local. Esta herramienta permite cargar cualquier tipo de conjunto de datos geoespaciales. Para el sistema propuesto se van a utilizar los datos proporcionados por la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [19], la cual cubre casi toda la superficie de la Tierra con una precisión elevada, de 30 metros en el Ecuador en el caso de SRTM30m. Dado que este conjunto de datos abarca una gran extensión, se divide en varios fragmentos, cada uno cubriendo diferentes áreas, ver Figura 3. Adicionalmente, se ha realizado un estudio de la validez de este conjunto de datos, obteniendo resultados en los que los errores de medición son muy bajos (apenas pocos metros).

Para las pruebas realizadas en este sistema, se ha limitado su área de aplicación (España), debido a limitaciones de almacenamiento de los dispositivos utilizados. Sin embargo, la incorporación de nuevas áreas al TS es muy sencilla, lo que permite adaptar el sistema a diferentes regiones geográficas fácilmente.

Una vez la información geoespacial se encuentra procesada y almacenada en el componente TS, será posible consultarla para poder calcular la pendiente existente entre dos coordenadas. Este cálculo se realiza dividiendo la diferencia de altitud de dichas coordenadas entre su distancia, al cual se aplica su porcentaje %. De esta forma la pendiente puede ser positiva (indicando una subida) o negativa (indicando una bajada).

En relación con las carreteras y su topología, varias métricas se han tenido en cuenta a la hora de ajustar la estimación de consumo, tales como la velocidad máxima permitida, el número de carriles disponibles e incluso el tipo de carretera (urbano o inter-urbano).

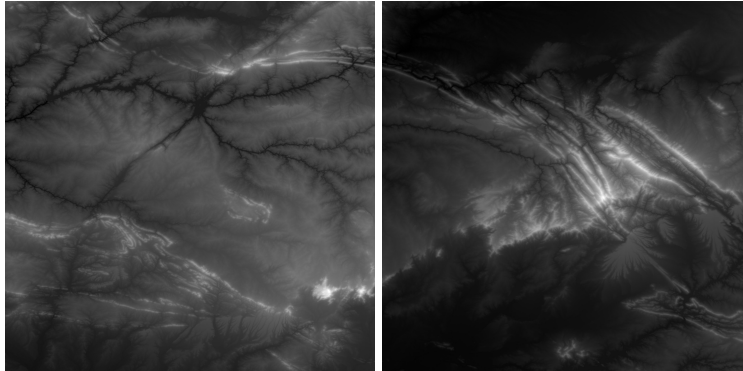


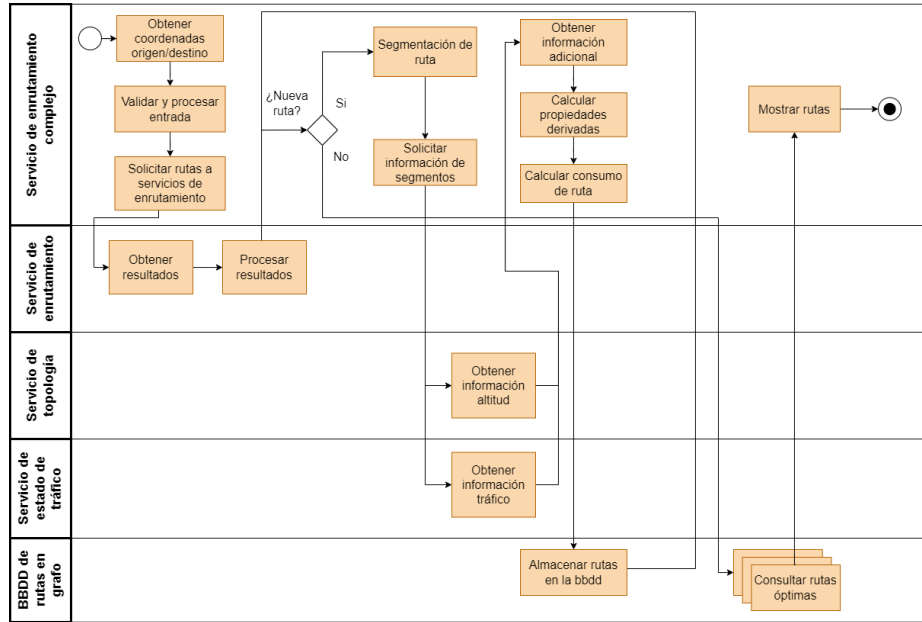
Figura 3: Ejemplos de ficheros SRTM30m.

5. Funcionamiento

En la Figura 4 se muestra el *workflow* de *AdEcoRPT*. El funcionamiento comienza con la selección del origen y destino a través de la interfaz web (WI) por parte del usuario. A continuación, el ARS procesa la información de entrada y realiza las peticiones pertinentes a los servicios necesarios, comenzando por el RS. Una vez se obtienen todas las posibles rutas, se procesan individualmente siguiendo los pasos:

- Se obtienen las coordenadas de la ruta.
- Se recupera información geospacial de cada coordenada usando el TS.
- Se realiza una segmentación por tramos.
- Para cada segmento:
 - se obtiene su longitud, límite de velocidad, tipo de vía, número de carriles y si posee restricciones.
 - se calcula su pendiente asociada
 - se obtiene el estado de congestión de tráfico mediante el TSS
- Se calcula el consumo estimado por ruta teniendo en cuenta el consumo medio por 100 kilómetros, la pendiente, el grado de congestión y la velocidad máxima de en cada segmento.
- Se almacena toda la información en el TDG

Una vez que todas las rutas han sido procesadas con éxito y almacenadas en la base de datos, se realizan tres consultas diferentes para determinar cuál es la ruta más corta (distancia total mínima), la más rápida (tiempo total de viaje mínimo) y la más ecológica (menor consumo de combustible, calculado a partir del estado de tráfico, pendientes y condiciones de los segmentos). Finalmente, los resultados de estas consultas se visualizan gráficamente en la interfaz web (WI), permitiendo a los usuarios seleccionar la ruta que mejor se adapte a sus preferencias o necesidades. Además, opcionalmente, se proporcionan indicaciones detalladas para la ruta seleccionada. Este enfoque integral asegura que los

Figura 4: *Workflow* de *AdEcoRPT*

usuarios tengan toda la información necesaria para tomar decisiones informadas sobre su viaje.

Por último, se describe un ejemplo en el que se han calculado diferentes rutas entre un punto de origen y otro de destino. En la Figura 5 se muestra la representación, mediante un grafo dirigido, de los datos almacenados en el componente RDG. Cada nodo representa un par de coordenadas (latitud, longitud), mientras que el enlace representa el segmento (vía) que une dos pares de coordenadas. Para este ejemplo se han obtenido cinco rutas: la más corta (en amarillo), la más rápida (en azul) y la eco-ruta (en verde). La Tabla 1 presenta estas rutas junto con sus trayectos y métricas calculadas: distancia (D), tiempo estimado de viaje (TEV), consumo estimado de combustible (CEC).

Tabla 1: Rutas calculadas. Recorrido y métricas relacionadas:

Ruta	Recorrido	D (metros)	TEV (minutos)	CEC (litros)
1	A, B, F, I	10501 (<i>corta</i>)	22,06	2,80
2	A, C, D, G, I	11212	28,32	2,48 (<i>eco-ruta</i>)
3	A, B, E, I	10856	17,26 (<i>rápida</i>)	2,69
4	A, H, E, F, I	10998	23,51	2.71
5	A, H, E, I	10658	21,82	2.64

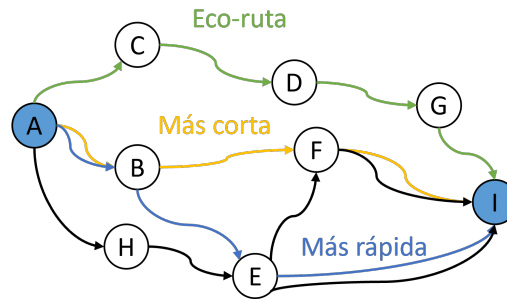


Figura 5: Grafo de las cinco rutas

6. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha presentado *Advanced Eco-Routing Planning Tool (AdEcoRPT)*, un framework diseñado para asistir a los usuarios en la planificación de viajes/rutas. Esta aplicación no sólo considera las rutas más rápidas o más cortas (funcionalidades ya ofrecidas por la mayoría de las aplicaciones de navegación existentes), sino que también incorpora eco-rutas, es decir, aquellas que minimizan el consumo de combustible y, por ende, la emisión de GEI.

A pesar de que algunas aplicaciones de planificación de rutas ya ofrecen a los usuarios eco-rutas, sus estimaciones sobre el consumo o ahorro de combustible a menudo no consideran factores críticos como la pendiente de la carretera. Para abordar esta limitación, el framework propuesto integra diversos servicios de planificación de rutas, datos topográficos y estado de tráfico, para obtener métricas más precisas y, por lo tanto, optimizar las rutas existentes.

En esta línea, se han identificado algunos posibles trabajos futuros: (1) mejorar las estimaciones de tiempo de viaje y consumo de combustible desarrollando modelos de consumo para diferentes tipos de vehículos y modos de conducción; (2) considerar limitaciones específicas de las ciudades como las zonas de cero emisiones, a la hora de calcular las rutas; e (3) integrar el framework completo en una API para facilitar el acceso remoto. Todas estas consideraciones permitirán una mayor personalización y mejora en la eficiencia de AdEcoRPT.

Agradecimientos Proyecto EcoTraffic APP (TED2021-132696B-I00) financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa. José R. Lozano-Pinilla agradece al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades su beca de Formación del Profesorado Universitario (FPU22/03681).

Referencias

1. Ericsson, E., Larsson, H., Brundell-Freij, K.: Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 14, pp. 369–383. (2006). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>.

2. Kono, T., Fushiki, T., Asada, K., Nakano, K.: Fuel consumption analysis and prediction model for “Eco” route search. In: 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America’s 2008 Annual Meeting. (2008) <https://trid.trb.org/view/902235>
3. Zeng, W., Miwa, T., Morikawa, T.: Prediction of vehicle CO₂ emission and its application to eco-routing navigation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 68, pp. 194–214. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.007>.
4. Zeng, W., Miwa, T., Morikawa, T.: Application of the support vector machine and heuristic k-shortest path algorithm to determine the most eco-friendly path with a travel time constraint, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 57, pp. 458–473. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.001>.
5. Zeng, W., Miwa, T., Morikawa, T.: Eco-routing problem considering fuel consumption and probabilistic travel time budget, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 78. (2020) <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102219>.
6. Aguiar, A., Fernandes, P., Guerreiro, A. P., Tomás, R., Agnelo, J., Santos, J. L., Araújo, F., Coelho, M. C., Fonseca, C. M., d’Orey, P. M., Luís, M., Sargento, S.: MobiWise: Eco-routing decision support leveraging the Internet of Things, *Sustainable Cities and Society*, vol. 87. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104180>.
7. Vamshi, B. and Prasad, R. V.: Dynamic route planning framework for minimal air pollution exposure in urban road transportation systems, 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Singapore, pp. 540–545. (2018) <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355209>.
8. Ghaffari, E., Rahmani, A. M., Saberikamarpashti, M. and Sahafi, A.: An Optimal Path-Finding Algorithm in Smart Cities by Considering Traffic congestion and Air Pollution, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 55126–55135. (2022) <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174598>.
9. Use eco-friendly routing on your Google Maps app, Google, <https://support.google.com/maps/answer/11470237?hl=en>. Last accessed 1 April 2023.
10. Google Maps is expanding its eco-friendly navigation feature to Europe, TechCrunch, <https://techcrunch.com/2022/09/06/google-maps-is-expanding-its-eco-friendly-navigation-feature-to-40-more-countries/>. Last accessed 1 July 2023.
11. OpenRouteService, <https://openrouteservice.org/>. Last accessed 10 July 2023.
12. Open Source Routing Machine, OSRM Project. <https://project-osrm.org/>. Last accessed 20 July 2023.
13. Open Source Routing Machine, GitHub. <https://github.com/Project-OSRM/osrm-backend>. Last accessed 14 July 2023.
14. GraphHopper, GraphHopper. <https://www.graphhopper.com/>. Last accessed 23 July 2023.
15. GraphHopper, GitHub, <https://github.com/graphhopper/graphhopper>. Last accessed 26 July 2023.
16. Open Topo Data, <https://www.opentopodata.org/>. Last accessed 30 June 2023.
17. Mapbox API, <https://docs.mapbox.com/api/overview/>. Last accessed 20 July 2023.
18. Containers Modeling Language (CML), GitHub. <https://github.com/elpiter15/CML>. Last accessed 4 July 2023.
19. Shuttle Radar Topography Mission, NASA. <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Last accessed 10 July 2023.

