

ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA CIUDAD DE RAFAELA: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN

Bordón, Maximiliano R.^{1,2}, Kühn, Priscila A.², Cravero, Luisina², Lang, Anahí²

¹Centro de Investigación y Transferencia Rafaela (CIT Rafaela), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) – Bv. Roca 989, Rafaela, C.P. 2300 – Santa Fe

Tel. 3492-501155 – e-mail: mbordon@santafe-conicet.gov.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta un análisis cualitativo preliminar sobre la viabilidad de instalación de estaciones de carga para vehículos eléctricos compartidos (bicicletas) en la ciudad de Rafaela, considerando distintos tipos de infraestructuras de carga, ya sea mediante diferentes capacidades de carga o tipo de conexión (on-grid/off-grid). Para abordar este desafío se presenta un modelo matemático mixto-entero lineal que permite determinar en forma óptima la ubicación y el tipo de estaciones de carga a instalar, minimizando los costos totales de instalación y operación como así también maximizando los niveles de cobertura de la ciudad. A partir de información recolectada a través de encuestas, en donde se identifican necesidades de movimiento entre distintos sectores de la ciudad, se construye un caso de estudio prototípico para el desarrollo del análisis pertinente. De los resultados obtenidos por el modelo en el caso de estudio analizado, se concluye que la instalación de estaciones de carga no solo permitiría reducir los costos (de instalación y operativos) al tiempo que se maximiza la cobertura de la ciudad, sino que también habilitaría el acceso a usuarios potenciales del sistema vehículos eléctricos compartidos, promoviendo una mayor adopción de esta tecnología en la ciudad.

Palabras clave: vehículos eléctricos, modelado matemático, infraestructura de carga, logística urbana, micro-movilidad.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos eléctricos a base de baterías (VEBs) han experimentado un crecimiento significativo en la última década, impulsados por avances tecnológicos, políticas gubernamentales favorables y una mayor conciencia ambiental, especialmente en lo que respecta a micro-movilidad (Moschopoulou et al., 2023). De acuerdo con (Loustric y Matyas, 2020), los principales beneficios con los que cuenta este tipo de tecnología están relacionados con el uso de baterías (mínima contaminación y bajos costos de operación), el tamaño (ocupan poco espacio en tránsito y en estacionamientos), la maniobrabilidad (facilidad de operación, adecuados para conducción en ciudad), velocidades máximas y condiciones de uso. Estos beneficios han sido motivadores para incorporar este tipo de tecnología en los sistemas de transporte público de pasajeros en el formato multimodal (Ignaccolo et al., 2022; Pedroza-Perez et al., 2024).

Si bien las soluciones basadas en micro-movilidad tienen un rol clave en la persecución de los objetivos de desarrollo sustentable de las ciudades (Olabi et al., 2023), éstas aún presentan diferentes barreras en cuanto a su plena implementación. De acuerdo con (Corti et al., 2024), estas barreras pueden agruparse en seis factores: ansiedad por la autonomía (inseguridad relacionada con el desconocimiento de tener disponible o no un lugar para recargar energía durante el trayecto), accesibilidad limitada (no contar con un sector de carga cercano al lugar de destino), regulaciones urbanas (instalaciones de carga no planificadas y protocolos de carga no unificados), costos asociados (fijos relacionados con la instalación de carga y variables relacionados con su mantenimiento), percepción/opinión pública (la inexistencia de instalaciones de carga pueden sugerir a la comunidad que el uso de VEBs no es conveniente), y

manufactura (elaboración y distribución de VEBs y gestión de baterías y componentes de instalaciones de carga). Los autores mencionan que la mayoría de estas barreras están directa o indirectamente vinculadas a la infraestructura de carga: el establecimiento de una red extensa de infraestructuras de carga puede ayudar a aliviar la ansiedad por la autonomía y reducir la accesibilidad limitada de los VEBs, aunque esto solo es posible si la infraestructura de carga está optimizada para tener un bajo costo de producción (alcanzable trabajando en la planificación urbana y la regulación).

Como se citó previamente, la infraestructura de carga es uno de los factores clave que determinan si los VEBs pueden o no ingresar al mercado a gran escala. Si la planificación y la selección de sitios para la instalación de infraestructura de carga no son razonables, esto provocará una serie de problemas, como una baja tasa de utilización de los cargadores, dificultades de carga para los usuarios de VEBs y obstáculos para la promoción del mercado de VEBs. Según (Tao et al., 2021), una planificación razonable de la selección de sitios y la capacidad de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos no solo puede reducir el impacto adverso en la estabilidad de la red, sino que también mejora considerablemente la conveniencia de viaje de los VEBs.

Dada la importancia y relevancia de la temática, en este trabajo se aborda (desde el punto de vista de investigación de operaciones) la problemática de la instalación de infraestructura de carga para VEBs de uso compartido, en el contexto de la ciudad de Rafaela. Este estudio está en consonancia con las políticas activas que lleva a cabo el Municipio, hecho que se manifiesta en diversos decretos y convenios con distintos agentes del entramado local, como por ejemplo convenios con empresas para la adquisición de VEBs (IDSR, 2021), como así también con instituciones de educación superior (IDSR, 2019) para el fomento del uso de VEBs. El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación financiado por la Universidad Nacional de Rafaela, en donde el objetivo es proponer soluciones efectivas y eficientes para los tópicos que se enmarcan en lo que se conoce como “logística urbana” (Patier y Routhier, 2020). En este contexto, se propuso realizar un primer análisis para evaluar la factibilidad de implementar tecnologías que favorezcan el desarrollo sostenible de la ciudad, entre ellas, fomentar el uso de vehículos eléctricos para el traslado de los ciudadanos. Para realizar un primer análisis sobre la viabilidad de implementación de infraestructura de carga en la ciudad de Rafaela se plantearon los siguientes pasos: (1) Diseño de encuesta para analizar los patrones de movimiento de los habitantes de la ciudad; (2) Recolección y análisis de la información; (3) Construcción/representación de la ciudad en términos propicios para el estudio que se realiza en este trabajo (construcción de grafo); (4) Modelado del problema de instalación de estaciones de carga; y (5) Análisis de los resultados preliminares obtenidos. En lo que respecta al problema a abordar en este trabajo, lo que se pretende es determinar la cantidad y tipo de estaciones de carga a instalar en la ciudad de manera tal que se maximice el acceso a dichas estaciones de carga y se minimicen tanto los costos de instalación de las mismas como las distancias entre los demandantes y las estaciones instaladas.

Desde el punto de vista estrictamente matemático, este problema es uno de cobertura capacitado (Snyder, 2011), el cual está estrechamente relacionado con el problema de cobertura y localización capacitado (CSCLP, de sus siglas en inglés) (Toregas et al., 1971), y el problema de localización y cobertura máxima capacitado (CMCLP, de sus siglas en inglés) (Church y ReVelle, 1974). La meta del CSCLP es determinar la cantidad mínima de instalaciones necesarias para asegurar que todos los nodos de demanda estén cubiertos (es decir, ubicados dentro de la distancia máxima de servicio, S , de una instalación operativa) y que ninguna instalación reciba una demanda total que exceda su capacidad. Por otro lado, el objetivo del CMCLP es posicionar un número fijo de instalaciones, p , de tal forma que se maximice la demanda total cubierta, garantizando que ninguna instalación sobrepase su capacidad en términos de demanda asignada. Bajo ciertas suposiciones (Current y Storbeck, 1988), ambos problemas pueden ser representados como un problema de localización de plantas capacitado, como un problema de p -medias capacitado o, incluso, como un problema de asignación generalizado, por lo que las formulaciones encontradas en la literatura responden, por lo general, a una de estas representaciones. En (Wang, 2007) se presenta un modelo para la localización de estaciones de recarga, utilizando programación entera para optimizar la ubicación de las estaciones. El modelo fue validado y sometido a análisis de sensibilidad, considerando factores como el tiempo mínimo de recarga, la duración de la estancia en el destino, el tamaño de la flota, la capacidad de las estaciones y los costos asociados. Por su parte, en (He et al., 2016) se analiza el impacto de las principales formulaciones tradicionales

(cobertura de conjunto, localización y cobertura máxima, y p-medias, en sus versiones no capacitadas) en un caso de estudio de Beijing, China. En (Chen et al., 2018) los autores proponen un modelo matemático entero para decidir sobre la instalación de estaciones de carga o estaciones de intercambio de baterías, buscando maximizar la rentabilidad asociada a la operación. Dada la complejidad del problema, recurren a una metaheurística para su abordaje (metaheurística de optimización de enjambre de partículas multi-objetivo, PSO, de sus siglas en inglés). En (Wang y Lin, 2013) se discute la instalación de estaciones de carga bajo el supuesto de una formulación basada en localización de plantas, considerando como función objetivo la maximización del flujo en red. El problema subyacente que trabajan los autores es en qué lugar de un determinado recorrido han de instalarse estaciones de carga de forma tal que se garantice el suministro de energía para el trayecto completo, desde el punto de vista del proveedor del servicio (no así de los usuarios).

A diferencia de los trabajos mencionados anteriormente, aquí se considera como variable de decisión la selección de la capacidad de las estaciones de carga a instalar, como así también se integran diversos objetivos en la misma función, a saber, maximizar cobertura de la ciudad y minimizar los costos de instalación. En este trabajo no se consideran aspectos relacionados con la operatoria semanal/mensual, ya que se trata de un problema de índole estratégica. En la siguiente sección se presenta la descripción formal del problema a modelar, como así también el modelo matemático desarrollado.

METODOLOGÍA

En esta sección se describe en detalle el problema a abordar y se analiza un ejemplo ilustrativo para explicar los resultados obtenibles. Específicamente, en la sub-sección “*Descripción del problema*” se presenta la descripción matemática formal del problema a abordar, mientras que en la sub-sección “*Validación del modelo: ejemplo ilustrativo*” se presenta un ejemplo numérico para comprender los alcances de la metodología, la relación entre las variables de decisión y las soluciones de compromiso.

A través del modelo matemático se busca optimizar la ubicación y capacidad de las estaciones de carga en una red, con el objetivo de minimizar los costos totales asociados a la instalación de estaciones, la operación de las mismas y el traslado de los clientes (usuarios) hacia las estaciones instaladas. El modelo no solo considera estos costos, sino también penalizaciones por demanda no cubierta, estableciendo un equilibrio entre cubrir la mayor demanda posible y los costos de instalación. Para exemplificar esto, supóngase que un usuario demanda 100 unidades de carga, y que existen dos opciones: instalar una estación de carga de menor capacidad (80 unidades) con un costo de instalación de \$15.000 en un nodo cercano al cliente y no cubrir 20 unidades de carga demandadas, o bien instalar una estación de carga de mayor capacidad (150 unidades) con un costo de \$25.000 en un nodo más alejado cubriendo toda la demanda (con distancias entre cliente y estación más largas): el modelo debe decidir no solo dónde instalar las estaciones, sino también qué tipo de estación instalar y qué parte de la demanda de cada cliente asignar a cada estación instalada. Además, si la distancia entre el cliente y una estación es mayor que la máxima permitida (digamos 10 km), esa demanda no podrá ser cubierta, lo que implica una solución de compromiso entre el costo de instalar nuevas estaciones y el costo de no cubrir la demanda. Así, el modelo enfrenta decisiones estratégicas: ¿es preferible instalar más estaciones cercanas para minimizar la penalización por demanda no cubierta, o centralizar las estaciones y aceptar un mayor costo por no cubrir algunas demandas? Este tipo de análisis permite identificar los compromisos o “trade-offs” que se deben gestionar entre los costos de instalación, el nivel de servicio y las distancias de desplazamiento. A continuación, se presenta formalmente el modelo matemático que considera las decisiones previamente mencionadas.

Descripción del problema

El modelo propuesto busca optimizar la ubicación y capacidad de las estaciones de carga para cubrir la demanda de clientes en una red, minimizando los costos asociados a la instalación, operación y traslado hacia las estaciones instaladas, mientras se respetan las capacidades de las estaciones y se cumplen ciertos requisitos de cobertura y cantidad máxima de estaciones de carga a instalar.

Supóngase que se tiene un conjunto de N clientes $I = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}$, que demandan un cierto número de cargas de la red (dem_i), la cual puede ser provista por un conjunto de M posibles estaciones de carga

$J = \{j_1, j_2, \dots, j_M\}$, siendo $J \subseteq I$. A su vez, las potenciales estaciones de carga j pueden albergar a lo sumo uno de los L tipos de instalaciones disponibles (diferentes capacidades de suministro de energía en términos de número de cargas completas), dadas por el conjunto $K = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$, siendo $k_1 \leq k_2 \leq \dots \leq k_L$ en términos de energía provista. Cada una de las posibles L instalaciones de carga poseen una capacidad máxima de carga ($capmax_k$) y un costo de instalación asociado ($cfix_k$). Para que un cliente i pueda ser asignado a una estación instalada en la ubicación j (es decir, para que se asigne parcial o totalmente la demanda de un cliente a una estación) debe considerarse una distancia máxima tolerable de desplazamiento hacia la estación (S), siendo una ubicación potencial j admisible cuando $dist_{i,j} \leq S$, es decir, cuando la distancia de traslado desde i hacia j ($dist_{i,j}$) no supere un máximo permisible. En caso de que la estación se instale en una ubicación que supere dicho margen tolerable, esa demanda será considerada no cubierta (y, por ende, será penalizada).

El objetivo es determinar la ubicación óptima de estas instalaciones y la asignación de la demanda de los clientes a las mismas, de manera que se minimicen los costos totales. Estos costos incluyen: (a) costos por no cubrir demanda, en donde por cada unidad de demanda no atendida se incurre en un costo cu ; (b) costos fijos de instalación de estaciones de carga; y (c) costos de traslado desde el cliente i hacia la estación de carga instalada en la ubicación j , si es que dicho cliente es asignado a la estación.

El modelo matemático desarrollado es el siguiente:

$$\min f^1 * \sum_i cu * dem_i * U_i + f^2 * \sum_j \sum_k cfix_k * Y_{j,k} + f^3 * \sum_i \sum_j dist_{i,j} * X_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{j|dist_{i,j} \leq S} X_{i,j} + U_i = 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i|dist_{i,j} \leq S} dem_i * X_{i,j} - \sum_k capmax_k * Y_{j,k} \leq 0, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{j,k} \leq 1, \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$pmin_k \leq \sum_j Y_{j,k} \leq pmax_k, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$ptot \leq \sum_j \sum_k Y_{j,k} \quad (6)$$

$$Y_{j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (7)$$

$$0 \leq X_{i,j} \leq 1, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$0 \leq U_i \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

El objetivo del modelo se expresa en la Ec. (1), que busca minimizar los costos totales de operación, compuestos por costos asociados a la demanda no cubierta (primer término), costos de instalación de estaciones de carga (segundo término) y costos de traslado desde las ubicaciones de los clientes hacia las estaciones instaladas (tercer término). Este último término considera los costos asociados al traslado de la porción de la demanda cubierta del cliente. Los factores f^1 , f^2 y f^3 permiten dar diferentes ponderaciones a los términos de la función objetivo según la importancia que tengan para quien ejerza el rol de tomador de decisión. La variable U_i representa la porción de la demanda del cliente i no cubierta. La variable $Y_{j,k}$ representa la decisión de instalar o no una estación de carga en la ubicación j con capacidad de suministro k . Finalmente, la variable $X_{i,j}$ representa la porción de la demanda del cliente i asignada (cubierta) por la estación de carga ubicada en la instalación j .

En lo que respecta al conjunto de restricciones, Ec. (2) asegura que toda la demanda de cada cliente i debe ser cubierta por una instalación j dentro de un rango máximo S , o bien debe ser considerada como no cubierta; Ec. (3) establece que la demanda total asignada a una instalación j no debe exceder su capacidad máxima, que depende del tipo de instalación k seleccionada; Ec. (4) garantiza que en una

ubicación j sólo puede instalarse una única estación; Ec. (5) asegura que el número de estaciones de carga a instalar de cada tipo k se mantenga entre un mínimo y máximo, es decir, limitar la cantidad total de estaciones de carga a instalar de una dada capacidad de carga (por ejemplo, como mucho se pueden instalar 3 estaciones de tipo k_1 pero necesariamente se debe instalar al menos una estación de ese tipo); Ec. (6) establece que, como mínimo, se deben instalar $ptot$ estaciones de carga, independientemente del tipo; Ec. (7) expresa el dominio de la variable $Y_{j,k}$, limitándola a valores 0 o 1 (variable binaria); finalmente, Ecs. (8, 9) expresan el dominio de las variables $X_{i,j}$ y U_i , respectivamente, limitándolas a valores entre 0 y 1 (variables continuas).

Validación del modelo: ejemplo ilustrativo

Para analizar las soluciones de compromiso que afronta este modelo y para mostrar cómo se comporta el mismo ante diversas configuraciones de parámetros, analizaremos las soluciones obtenidas con el ejemplo ilustrativo que se describe en la Tabla 1.

Tabla 1: Coordenadas y demanda asociada a cada cliente

i	Coord.X	Coord.Y	Dem	i	Coord.X	Coord.Y	Dem	i	Coord.X	Coord.Y	Dem
1	12	16	10	6	8	15	15	11	10	10	1
2	16	9	1	7	3	4	18	12	4	5	1
3	9	13	10	8	18	15	19	13	13	5	2
4	3	16	1	9	5	19	5	14	20	19	30
5	3	14	1	10	10	12	1	15	3	8	10

Por cuestiones de espacio sólo se analizará el impacto de: la distancia máxima tolerable, S , y la cantidad mínima de estaciones a instalar, $ptot$. En todas las corridas, se considerarán 2 tipos de estaciones de carga (k_1 y k_2), con capacidades de suministro de 80 y 150 cargas completas, respectivamente. Los costos fijos asociados a la instalación de cada tipo de estación de carga serán \$15.000 y \$25.000, respectivamente. Como máximo se podrán instalar 3 y 2 estaciones de carga, respectivamente. El costo unitario por demanda no cubierta será de \$10. Se asume, además, que los factores f^1 , f^2 y f^3 tienen el mismo peso (por defecto, 1). La distancia entre dos nodos i y j es computada según distancia Manhattan, a saber, $dist_{i,j} = |coordx_i - coordx_j| + |coordy_i - coordy_j|$.

Los valores considerados para los parámetros en cuestión son los siguientes: $S = [5, 10, 15, 20]$, $ptot = [1, 2]$. Los resultados de cada corrida se expresan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados obtenidos en los escenarios analizados

Escenario	S	ptot	Utot	Xtot	Ysel	Escenario	S	ptot	Utot	Xtot	Ysel
1	5	1	89	36	6(1)	5	5	2	59	66	6(1), 14(1)
2	10	1	50	75	8(1)	6	10	2	3	122	5(1), 8(1)
3	15	1	45	80	1(1)	7	15	2	1	124	1(1), 5(1)
4	20	1	45	80	1(1)	8	20	2	0	125	5(1), 10(1)

Cabe destacar que tanto para la resolución de este ejemplo introductorio como para la resolución del caso de estudio (ver siguiente sección) se utiliza el software comercial GAMS 41.5.0 (Rosenthal, 2007) y como solver se utiliza CPLEX. Todos los ejemplos son ejecutados en una laptop Dell Inspiron 15, procesador AMD A12-9700P 2.5 GHz, memoria RAM 8 GB.

En la Tabla 2, en $Utot$ se presenta la demanda total no cubierta por la solución obtenida, en $Xtot$ se presenta la demanda total cubierta, y en $Ysel$ se presenta la selección de ubicaciones para instalar la estación y el tipo de estación instalada entre paréntesis (formato *nodo_seleccionado(tipo_estación)*). Los valores de la función objetivo para los escenarios 1 a 8 fueron {\$15.903; \$15.532; \$15.477,60; \$15477,60; \$30.603; \$30.109; \$30.101,53; \$30.098,60}, respectivamente. Existen diferentes situaciones para destacar en este ejemplo. Por empezar, notar que para el caso de los escenarios 3 y 4 la distancia máxima tolerable no influye en el resultado final (obtenemos la misma solución, tanto en costo como en ubicaciones). Esto se debe a que el costo unitario por demanda no cubierta es muy inferior al costo fijo de instalación de estaciones de carga (\$10 vs \$15.000/\$25.000), y como estamos penalizando no sólo la

demanda no cubierta sino también la distancia desde cada cliente hacia la estación de carga instalada (tercer término de la Ec. (1)) el modelo opta por no abrir otra estación ya que necesariamente incurrirá en mayores costos (notar que la demanda total cubierta, X_{tot} en la Tabla 1, se mantiene en 80 unidades de carga para los escenarios 3 y 4).

Si quisieramos observar el efecto de no cubrir demanda, podríamos o bien modificar los factores f^1 , f^2 y f^3 (distintas penalizaciones de la función objetivo) o bien podríamos modificar el costo unitario por no cubrir demanda, cu . Para simplificar el análisis, optaremos por modificar el parámetro cu a, digamos, \$1.000: de esta manera, la solución óptima para este escenario (el número 4) es instalar una única estación de carga (de tipo k_2) en el nodo 6, siendo suficiente para cubrir toda la demanda existente. Notar que la demanda total de este ejemplo ilustrativo asciende a 125 unidades de carga, y para cubrir toda esa demanda podemos o bien instalar 2 estaciones de tipo k_1 (capacidad de suministro total: 160 unidades de carga) o bien instalar una única estación de tipo k_2 (capacidad de suministro total: 150 unidades de carga), como sucede en este caso. Optar por instalar dos estaciones de carga de 80 unidades de carga cada una es más costoso que instalar una única estación de 150 unidades de carga (\$30.000 vs \$25.000).

En lo que respecta al resto de los escenarios considerados, en la Figura 1 se detallan gráficamente las soluciones obtenidas para los escenarios 5 (Figura 1-a) y 6 (Figura 1-b), mientras que en la Figura 2 se detallan los resultados para los escenarios 7 (Figura 2-a) y 8 (Figura 2-b).

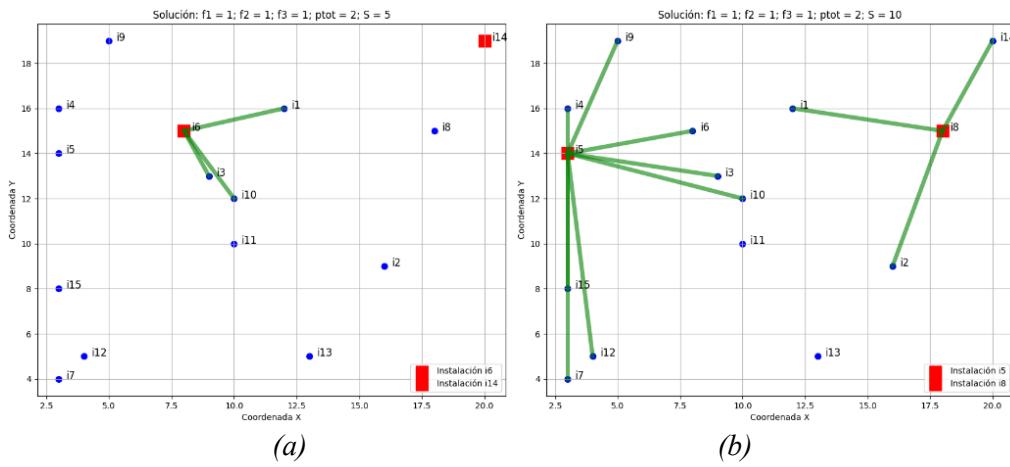


Figura 1: Solución obtenida para los escenarios (a) 5 y (b) 6.

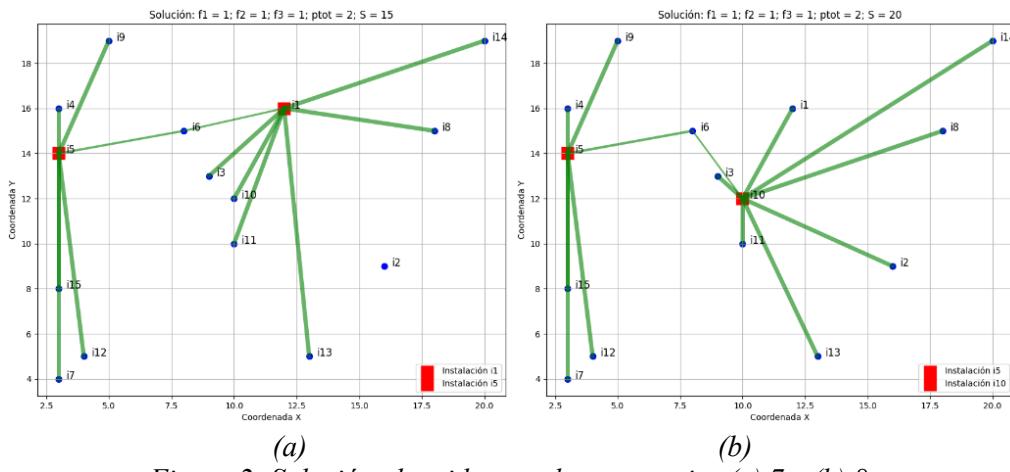


Figura 2: Solución obtenida para los escenarios (a) 7 y (b) 8.

En la Figura 1 se aprecia el efecto que tiene la distancia máxima tolerable para asignar un cliente a una estación de carga instalada. Para el caso del escenario 5 (Figura 1-a), se decide instalar dos estaciones de tipo k_1 en los nodos 6 y 14. Lo primero que se observa es la instalación en el nodo 14, la justificación de esta elección por parte del modelo es que dicho nodo tiene una demanda de 30 unidades (ver Tabla 1), por lo que la instalación de una estación en este nodo justifica su existencia (notar que la demanda

total cubierta para este escenario es de 66 unidades de carga y que los 3 nodos con mayores requerimientos son cubiertos por al menos una estación de carga).

En el escenario 6 (Figura 1-b) puede observarse que, al elegirse los nodos 5 y 8 para instalar una estación de carga, la demanda total cubierta asciende a 122 unidades de carga, siendo las 3 unidades de carga no cubiertas las correspondientes a los nodos 11 y 13 (ver Tabla 1). En este caso, el costo total de operación disminuye debido a una mayor cobertura de la demanda (el costo asociado al primer término de la Ec. (1) es reducido respecto al escenario 5). De manera similar sucede en el escenario 7 (Figura 2-a), en donde un aumento de la distancia máxima tolerable genera un corrimiento de la estación de carga instalada en el nodo 8 (escenario 6) al nodo 1 (escenario 7), dejando sin atender la demanda del nodo 2 (1 unidad de carga). Tanto en este escenario como en el escenario 8 (Figura 2-b) se observa un comportamiento particular: la cobertura parcial del nodo 6 por dos estaciones de carga diferentes. En ambos escenarios (7 y 8) la mayor parte de la demanda del nodo 6 es asignada al nodo 5 (el nodo estación más lejano en ambos escenarios). Esto sucede así ya que los nodos 1, 8 y 14 tienen demandas importantes (ver Tabla 1) y resulta conveniente asignarlas a la estación más cercana (nodo 10), debido al tercer término de la Ec. (1).

Si bien el análisis anterior reviste de poco interés práctico, da un lineamiento general para comprender los diferentes compromisos y el impacto que tienen distintos parámetros en las soluciones obtenidas. En la siguiente sección se presenta el caso de estudio de la ciudad de Rafaela y se discuten resumidamente algunas consideraciones adicionales.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Retomando lo presentado en la sección de INTRODUCCIÓN, este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación financiado por la Universidad Nacional de Rafaela, en donde el objetivo es proponer soluciones efectivas y eficientes para los tópicos que se enmarcan en lo que se conoce como “logística urbana”. Para realizar un primer análisis sobre la viabilidad de implementación de infraestructura de carga en la ciudad de Rafaela se plantearon los siguientes pasos: (1) Diseño de encuesta para analizar los patrones de movimiento de los habitantes de la ciudad; (2) Recolección y análisis de la información; (3) Construcción/representación de la ciudad en términos propicios para el estudio que se realiza en este trabajo (construcción de grafo); (4) Modelado del problema de instalación de estaciones de carga; y (5) Análisis de los resultados preliminares obtenidos.

Este trabajo se enfoca en los pasos (3), (4) y (5), previamente mencionados. En línea con esto, en la Figura 3 se presenta una primera caracterización de la ciudad, en donde cada nodo representa una intersección de dos calles. En la Figura 3-a se presenta la versión completa de la ciudad (2861 nodos), mientras que en la Figura 3-b se presenta la versión compacta (43 nodos, cada nodo representa un punto emblemático de cada barrio o sector de la ciudad). Para obtener las coordenadas de cada nodo se utilizó la librería OSMnx de Python (Boeing, 2024).

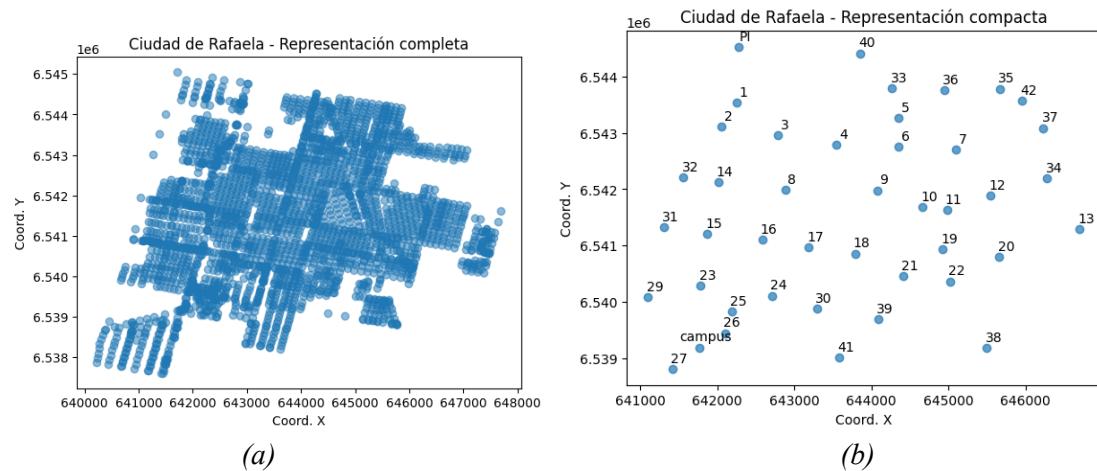


Figura 3: Representación de la ciudad de Rafaela (a) versión completa, (b) versión compacta

Dado que el modelo matemático propuesto para abordar la problemática es de tipo NP-Hard (Karp, 1972), se decide trabajar con una versión simplificada del grafo, sin comprometer la calidad de los resultados obtenibles. Esta simplificación es necesaria debido a la complejidad generada por el grafo original.

Con estas consideraciones, el caso de estudio consta de un conjunto de 43 clientes $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{43}\}$. Para determinar los niveles de demanda de este conjunto de clientes, se utilizaron resultados preliminares de la encuesta de movilidad en curso (paso (2) mencionado al inicio de esta sección), en donde se identificaron los requerimientos de clientes en el formato “par OD” (par origen-destino). Así, la demanda computada está compuesta por todos los requerimientos desde y hacia un determinado cliente i . A efectos de esta presentación, se modificaron aleatoriamente determinadas demandas (la encuesta aún está en desarrollo y no se cuenta con información definitiva). Cabe destacar que cada uno de los clientes también representa una ubicación potencial de estaciones de carga (es decir, $I = J$). Se aclara que en este caso de estudio también se computa la distancia en dos nodos según distancia Manhattan.

Para el caso de las potenciales estaciones de carga a instalar, se consideran 6 tipos diferentes ($K = \{k_1, k_2, \dots, k_6\}$, en donde k_1 a k_5 se asocian a estaciones autónomas con distintas capacidades, y k_6 a estaciones de tipo on-grid). Las capacidades de carga de cada tipo de estación, a modo de referencia y sin perder generalidad en lo que respecta al caso de estudio, se asumen de $\{480, 730, 975, 1215, 2430, 9320\}$ en unidades de carga suministradas. Cabe destacar que se asume que la estación de carga on-grid k_6 tiene capacidad para abastecer la demanda completa del caso de estudio (9320 unidades de carga). Para este estudio preliminar se asume que la cantidad máxima de estaciones de carga a instalar, por tipo, es de $\{10, 10, 10, 7, 5, 1\}$. En lo que respecta a los costos de instalación de las estaciones de carga considerados, a modo de referencia y sin comprometer la calidad de los resultados, son de $\{10.300, 13.500, 16.000, 17.500, 30.000, 100.000\}$ unidades monetarias (\$). El costo unitario por carga no abastecida se considera de \$50.

Los factores f^1 , f^2 y f^3 nuevamente se consideran idénticos, y se asume un mínimo de 2 estaciones de carga a instalar (de cualquiera de los tipos disponibles). En las figuras Figura 4 y Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para $S = [300, 500, 700, 2000]$, es decir, distancias máximas tolerables (para alcanzar una estación de carga) de 300, 500, 700 y 2000 metros, respectivamente.

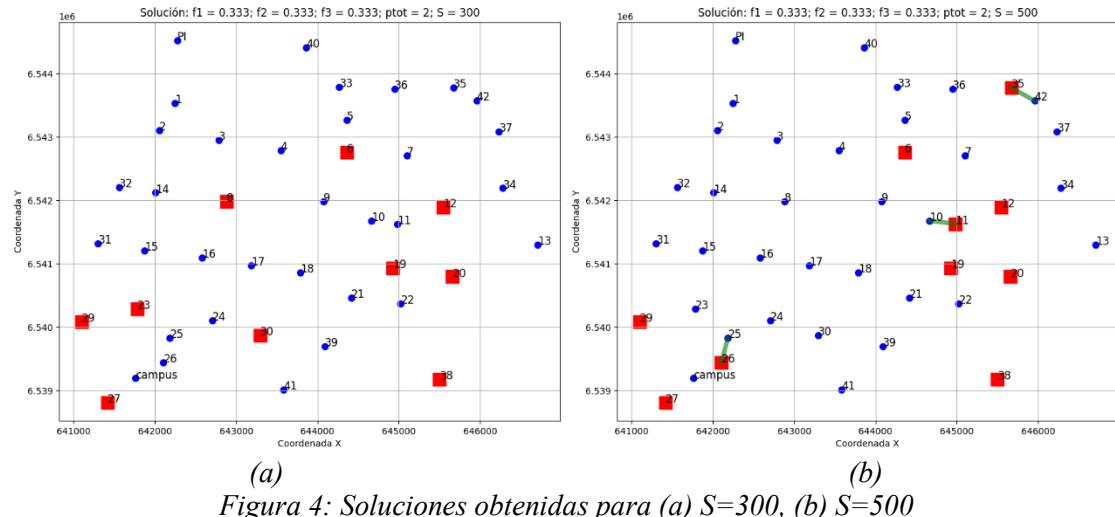


Figura 4: Soluciones obtenidas para (a) $S=300$, (b) $S=500$

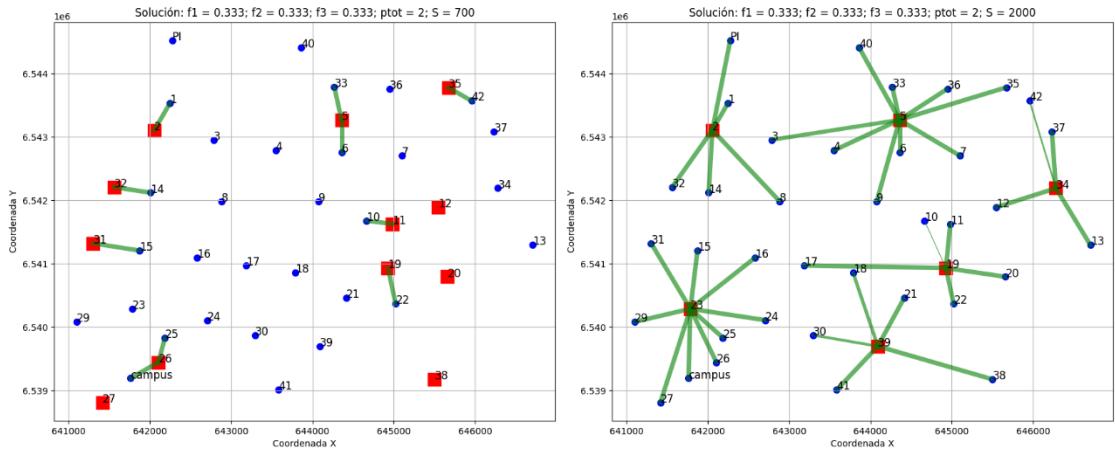


Figura 5: Soluciones obtenidas para (a) $S=700$, (b) $S=2000$

En el escenario representado por la Figura 4-a ($S=300$) se deciden instalar 10 estaciones de carga de tipo k_1 (off-grid) en los barrios/sectores 6, 8, 12, 19, 20, 23, 27, 29, 30 y 38, cubriendo sólo la demanda de los sectores mencionados, dejando sin cubrir un total de 6.781 unidades de carga (de 9320). Con esta configuración se obtiene una cobertura del 27,24%, a un costo total de \$146.203,65.

En el escenario representado por la Figura 4-b ($S=500$) se deciden instalar 10 estaciones de carga de tipo k_1 (off-grid) en los barrios/sectores 6, 11, 12, 19, 20, 26, 27, 29, 35 y 38. En esta solución se decide cubrir la demanda del nodo 11 (sector caracterizado por una de las dos universidades más importantes de la ciudad), a costa de no cubrir la demanda de la zona céntrica (representada por el nodo 8, cubierta en el escenario anterior). En el escenario previo se instala una estación cercana al campus de la Universidad Nacional de Rafaela (en el nodo 27) pero no se asigna demanda específica del campus a dicho nodo, en cambio en este escenario se deciden instalar dos estaciones cercanas (en los nodos 27 y 26), siendo el nodo 26 el responsable de cubrir la demanda generada en dicho campus. La demanda total no cubierta en esta solución asciende a 6.266 unidades de carga. Aquí la cobertura asciende al 32,76%, con un costo de \$138.072,78.

En el escenario representado por la Figura 5-a ($S=700$) se deciden instalar 12 estaciones de carga, 10 de tipo k_1 (off-grid) y 2 de tipo k_2 (off-grid). Las ubicaciones para las estaciones de tipo k_1 son 2, 11, 12, 19, 20, 27, 31, 32, 35 y 38, mientras que en los barrios/sectores 5 y 26 se deciden instalar estaciones de tipo k_2 (en este caso en particular, la máxima cantidad de estaciones de tipo k_1 estaban limitadas a 10, por lo que el modelo decide optar por incorporar 2 de k_2). En este caso, la demanda total no cubierta asciende a 4.605 unidades de carga, siendo el costo asociado a esta solución de \$120.814,39.

Finalmente, en la Figura 5-b se presentan los resultados para un escenario en donde la distancia máxima tolerable para dirigirse hacia una estación de carga sea de 2 kilómetros. En este escenario se decide instalar un total de 6 estaciones de carga, siendo 1 estación de tipo k_3 , 3 estaciones de tipo k_4 y 2 estaciones de tipo k_5 , todas catalogadas como off-grid. La estación de tipo k_3 se instala en el nodo 34, las estaciones de tipo k_4 se instalan en los sectores 2, 19 y 39, y las estaciones de tipo k_5 se instalan en los sectores 5 y 23. Con esta solución, se logra cubrir el total de la demanda (9320 unidades de carga), con un costo de \$58.529,05.

Luego de una cuidadosa observación de los resultados obtenidos en el caso de estudio, es posible identificar soluciones de compromiso relacionadas con cobertura de demanda, costos asociados, diversificación de las estaciones de carga instaladas y ubicaciones estratégicas. Por ejemplo, resulta evidente que el escenario representado en la Figura 5-b logra máxima cobertura a menor costo que la solución del escenario representado por la Figura 5-a (las reducciones de costo se derivan de las reducciones logradas en el primer término de la ecuación Ec. (1) discutida previamente, ver sección METODOLOGÍA), sin embargo, desde el punto de vista de promoción e introducción de estas tecnologías en la ciudad podría resultar inconveniente e incluso contraproducente la instalación de grandes estaciones de carga concentradas en pocos sectores. En este sentido, el modelo presentado sirve

y actúa como guía para tomadores de decisiones, en virtud de decisiones que no fueron consideradas al momento de desarrollar una primera formulación (decisiones de índole política, de inclusión, de fomento de turismo, etc.), siendo posible, por ejemplo, asignar valores fijos a variables de interés. El modelo matemático propuesto habilita incorporar restricciones del tipo $Y('campus', 4) = 1$, indicando que la solución a un caso de estudio en particular debe incluir la instalación de una estación de tipo k_4 en el campus de la Universidad Nacional de Rafaela.

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se ha desarrollado y presentado un primer modelo matemático para la instalación de estaciones de carga de vehículos eléctricos en la ciudad de Rafaela. Este modelo representa un avance en lo que respecta a la planificación urbana y la promoción de la movilidad eléctrica en la región. A partir de los resultados obtenidos, es posible resaltar varios aspectos clave. El modelo propuesto permite minimizar los costos asociados con la instalación de estaciones de carga, lo que resulta en una solución económicamente viable para los tomadores de decisiones. La metodología utilizada facilita la identificación de ubicaciones óptimas que no solo maximizan la cobertura para los usuarios de vehículos eléctricos, sino que también optimizan el uso de recursos financieros. El modelo se constituye como una herramienta preliminar valiosa para los planificadores urbanos y las autoridades locales, quienes pueden utilizarlo como base para la implementación de una red de estaciones de carga en la ciudad. Aunque es un primer paso, el modelo proporciona una guía fundamentada para orientar futuras inversiones y desarrollos en el ámbito de la movilidad eléctrica. En lo que respecta al contexto local, hasta la fecha no existía un estudio de estas características. La propuesta de este modelo intenta abordar este vacío y establece un precedente para futuros estudios. La investigación realizada destaca la necesidad y la urgencia de abordar la infraestructura para vehículos eléctricos en la ciudad, y este modelo sienta las bases para trabajos más detallados y específicos.

Aunque el modelo presentado en este estudio ofrece una herramienta valiosa para la planificación de estaciones de carga de vehículos eléctricos en Rafaela, es importante reconocer varias limitaciones inherentes a la metodología utilizada. Una gran limitante es la complejidad computacional asociada: el modelo formulado se inscribe en la lista de problemas NP-Hard, lo que significa que su resolución exacta es computacionalmente difícil, especialmente para instancias de gran tamaño. Esto plantea la necesidad de desarrollar algoritmos de resolución más eficientes, basados en algoritmos evolutivos y, preferentemente, en técnicas de simulación. Estas técnicas podrían ofrecer soluciones cercanas al óptimo en tiempos razonables, lo que es crucial para la aplicabilidad práctica del modelo. Lo anterior (complejidad computacional), se potencia con otra limitante del modelo propuesto: la ausencia de decisiones de índole operacional y táctica. El modelo se centra en la ubicación estratégica de las estaciones de carga, pero no considera aspectos como los patrones de carga de los VEBs y los ciclos de recarga de las estaciones, particularmente si se basan en fuentes de energía renovable como paneles solares. Para mejorar la utilidad del modelo, resulta necesario extenderlo para incorporar estas dimensiones, lo que permitiría una planificación más integral y ajustada a las necesidades reales del sistema de movilidad eléctrica. Esta ampliación del problema redundaría en decisiones más complejas y, por lo tanto, implica una mayor dificultad a la hora de abordarlo.

Por último, pero no menos importante, se evidencian otras dos limitantes importantes en el modelo propuesto: simplificación en el diseño de las estaciones de carga y calidad de los datos utilizados. En referencia al diseño de las estaciones de carga, se asumieron parámetros de carga estándar sin entrar en detalles sobre el diseño físico y tecnológico de las estaciones. Sin embargo, el diseño adecuado de las estaciones es un factor crucial que debe ser considerado al determinar su ubicación. En futuras investigaciones, sería importante integrar el diseño de estaciones dentro del proceso de optimización para garantizar que las soluciones propuestas no solo sean óptimas en términos de ubicación, sino también en funcionalidad y eficiencia. Por otra parte, respecto a la calidad de los datos utilizados, el caso de estudio realizado se basó en gran medida en datos aleatorios, lo cual limita la precisión y la relevancia de los resultados obtenidos. Si bien la generación de datos se basó en los resultados preliminares de una encuesta de movilidad activa, fue necesario generar información aleatoria debido a la falta de datos. Es evidente que la disponibilidad de datos más fehacientes y de alta calidad mejoraría significativamente la precisión del modelo y la aplicabilidad de sus resultados.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Se agradece a la Universidad Nacional de Rafaela por el financiamiento otorgado para la realización del proyecto que integra el presente trabajo, titulado “*Optimización de operaciones logísticas urbanas: desarrollo e implementación de herramientas de apoyo para la toma de decisiones en Rafaela y la región*”. Res. Rectoral N°: 760/2023. N° expediente: 0013/2024.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a especialmente a la Secretaría de Investigación y Transferencia Tecnológica de la Universidad Nacional de Rafaela por los aportes y esfuerzos realizados para el normal desarrollo de las actividades de investigación relacionadas con el presente trabajo, como así también a los/as revisores/as por sus comentarios constructivos, los cuales ayudaron a clarificar los conceptos vertidos en el presente trabajo.

REFERENCIAS

Boeing, G. (2024). Modeling and Analyzing Urban Networks and Amenities with OSMnx. Dirección URL: <<https://geoffboeing.com/share/osmnx-paper.pdf>> [consulta: 10 de agosto de 2024]

Chen, Y. W., Cheng, C. Y., Li, S. F., & Yu, C. H. (2018). Location optimization for multiple types of charging stations for electric scooters. *Applied Soft Computing*, 67, 519-528. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.038>

Church, R., y Velle, C. R. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in regional science*, 32(1), 101-118. <https://doi.org/10.1007/BF01942293>

Corti, F., Iacono, S. D., Astolfi, D., Pasetti, M., Vasile, A., Reatti, A., y Flammini, A. (2024). A comprehensive review of charging infrastructure for Electric Micromobility Vehicles: Technologies and challenges. *Energy Reports*, 12, 545-567. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.026>

Current, J. R., y Storbeck, J. E. (1988). Capacitated covering models. *Environment and planning B: planning and Design*, 15(2), 153-163. <https://doi.org/10.1068/b150153>

He, S. Y., Kuo, Y. H., & Wu, D. (2016). Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 131-148. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003>

IDSR (2019) [en línea]. Convenio específico de vinculación tecnológica UNRaf-Municipalidad de Rafaela. Dirección URL: <<https://rafaelasustentable.com.ar/wp-content/uploads/2023/03/Convenio-entre-IDSR-y-UNRaf-Movilidad-5538.pdf>> [consulta: 10 de agosto de 2024]

IDSR (2021) [en línea]. Convenio de promoción de movilidad sustentable. Dirección URL: <<https://rafaelasustentable.com.ar/wp-content/uploads/2023/03/Convenio-entre-IDSR-y-Bertolaccini-S.A.-Movilidad-sustentable-6273.pdf>> [consulta: 10 de agosto de 2024]

Ignaccolo, M., Inturri, G., Cocuzza, E., Giuffrida, N., Le Pira, M., y Torrisi, V. (2022). Developing micromobility in urban areas: network planning criteria for e-scooters and electric micromobility devices. *Transportation research procedia*, 60, 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.058>

Karp, R.M. (1972). Reducibility among Combinatorial Problems. In: Miller, R.E., Thatcher, J.W., Bohlinger, J.D. (eds) *Complexity of Computer Computations*. The IBM Research Symposia Series. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9

Loustric, I., y Matyas, M. (2020). Exploring city propensity for the market success of micro-electric vehicles. *European Transport Research Review*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00416-8>

Moschopoulou, A., Frantzeskakis, I., Grizos, K., y Vlachopanagiotis, T. (2023). Park-and-Ride: The Case for Coupling EV Charging Stations with Micro-mobility Hubs. In *Conference on Sustainable Urban Mobility* (pp. 29-49). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23721-8_3

Olabi, A. G., Wilberforce, T., Obaideen, K., Sayed, E. T., Shehata, N., Alami, A. H., y Abdelkareem, M. A. (2023). Micromobility: Progress, benefits, challenges, policy and regulations, energy sources and storage, and its role in achieving sustainable development goals. *International Journal of Thermofluids*, 17, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100292>

Patier, D., y Routhier, J. L. (2020). Urban logistics in the light of sustainable development: Still a long way to go. *Transportation Research Procedia*, 46, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.168>

Pedroza-Perez, D., Toutouh, J., y Luque, G. (2024). Redesigning road infrastructure to integrate e-scooter micromobility as part of multimodal transportation. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (pp. 1336-1344). <https://doi.org/10.1145/3638529.3654142>

Rosenthal, R. E. (2007) [en línea]. A gams tutorial. GAMS-A User's Guide. Dirección URL: <https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/gams_prirucnik%5B1%5D.pdf> [consulta: 10 de agosto de 2024]

Snyder, L.V. (2011). Covering Problems. In: Eiselt, H., Marianov, V. (eds) Foundations of Location Analysis. International Series in Operations Research & Management Science, vol 155. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7572-0_6

Tao, Y., Huang, M. H., Chen, Y. P., y Yang, L. (2021). Review of optimized layout of electric vehicle charging infrastructures. *Journal of Central South University*, 28(10), 3268-3278. <https://doi.org/10.1007/s11771-021-4842-3>

Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., y Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations research*, 19(6), 1363-1373. <https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>

Wang, Y. W. (2007). An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(3), 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.02.002>

Wang, Y. W., & Lin, C. C. (2013). Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 58, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.07.003>

ANALYSIS OF THE LOCATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS IN THE CITY OF RAFAELA: A FIRST APPROACH

ABSTRACT This work presents a preliminary qualitative analysis of the feasibility of installing charging stations for shared electric vehicles (bicycles) in the city of Rafaela, considering different types of charging infrastructures, whether through various charging capacities or connection types (on-grid/off-grid). To address this challenge, a mixed-integer linear mathematical model is presented, which optimally determines the location and type of charging stations to be installed, minimizing total installation and operational costs while maximizing the city's coverage levels. Based on information collected through surveys that identify movement needs between different sectors of the city, a prototype case study is constructed to develop the relevant analysis. The results obtained from the model in the analyzed case study conclude that the installation of charging stations would not only reduce costs (installation and operational) while maximizing city coverage but also enable access for potential users of the shared electric vehicle system, promoting greater adoption of this technology in the city.

Keywords: electric vehicles, mathematical modeling, charging infrastructure, urban logistics, micromobility.