

Recomendaciones para desarrollar la infraestructura de carga de la flota de camiones en Colombia.

Cristiam Gil, Gustavo Martínez, Gordon Wilmsmeier.

Resumen

La infraestructura de carga para camiones eléctricos será clave para alcanzar las cero emisiones, contribuir a las metas del Gobierno Nacional y a los compromisos internacionales de reducción de emisiones en 2030 y carbono neutralidad en 2050. En este Policy Brief, estudiamos la problemática asociada a identificar las necesidades de infraestructura de carga desde el punto de vista de la demanda.

Diagnosticamos una problemática principal:

- No existe en el país un modelo de transporte automotor de carga (TAC) que permita priorizar, con datos de intensidad de uso de corredores nacionales y renovación de flota, la demanda de energía eléctrica en términos de probable ubicación de estaciones, cantidad de cargadores y tramos priorizados.

Hacemos una propuesta:

- Construir un modelo que priorice corredores basado en la disponibilidad de la tecnología eléctrica en vehículos de mediano alcance inicialmente y luego en camiones de largo alcance.
- Dicha propuesta permite priorizar las estaciones de carga en corredores nacionales basada únicamente en la demanda, lo cual se deberá contrastar en un modelo posterior con la oferta.

Agradecimientos

El proyecto GiroZero agradece las contribuciones y comentarios de sus beneficiarios: Departamento de Planeación (DNP), Ministerio de Transporte (MT), Asociación Nacional de Industriales (ANDI), Federación Colombiana de transportadores de carga por carretera (COLFECAR) y la Federación nacional de comerciantes empresarios (FENALCO).

Los GiroZero Policy Briefs analizan aspectos de políticas públicas de interés nacional y presentan recomendaciones específicas para la toma de decisiones de sector público y privado.



Introducción

La infraestructura de recarga de vehículos de transporte automotor de carga es fundamental para incrementar las tasas de adopción de camiones y tractocamiones eléctricos. Si son desplegados puntos de recarga a lo largo de la infraestructura carretera del país se podrá atender la demanda futura en los principales corredores y permitirá aumentar la confianza de los transportadores en la autonomía de los vehículos de cero emisiones (UPME, 2019). Hoy en día, el Gobierno Nacional está realizando un esfuerzo basado en documentos CONPES¹, el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 y la estructuración del nuevo fondo para la promoción de ascenso tecnológico para atender esta necesidad del sector (DNP, 2023b) con el fin de cumplir los compromisos internacionales de reducción de emisiones (Gobierno de Colombia, 2020). Este GiroZero Policy Brief quiere contribuir a este debate a través de un modelo de priorización de corredores de transporte de carga y cuantificación de la demanda de energía eléctrica en infraestructura de carga, que pretende servir para la toma de decisiones.

Dada la diversidad de camiones y perfiles operacionales en Colombia este Policy Brief usa el conjunto de los camiones C2 para visualizar una posible estrategia de implementación de estaciones de carga como ejemplo. El camión C2 representó en 2021 el 42% de los viajes registrados en el RNDC. El camión de dos ejes rígido es una de las configuraciones susceptible de

electrificación en el corto y mediano plazo dado el peso bruto vehicular y capacidad de hasta 8 toneladas, además del rango que pueden cubrir en sus viajes con baterías eléctricas.

La primera sección resume las principales determinantes de la infraestructura de recarga eléctrica, la segunda da cuenta de los avances en la política pública relacionada con infraestructura de recarga eléctrica para vehículos² en el territorio colombiano. En la siguiente sección se describe el modelo conceptual para la definición de la demanda de infraestructura de recarga eléctrica para un segmento de camiones en particular y la sección final establece unas recomendaciones de política pública para cuantificar y priorizar las intervenciones necesarias para cubrir las necesidades de demanda de infraestructura de recarga en el país.



Este GiroZero Policy Brief quiere contribuir a este debate a través de un modelo de priorización de corredores de transporte de carga y cuantificación de la demanda de energía eléctrica en infraestructura de carga, que pretende servir para la toma de decisiones.

1 Documentos CONPES 4075 de 2022, transición energética y 4129 de 2023 Política de reindustrialización.
2 Incluye lo aplicable a vehículos del sector TAC.

La infraestructura de recarga eléctrica

En la serie de Policy Briefs (Giro Zero, 2022a) (Giro Zero, 2023) y en la Hoja de Ruta del Proyecto Giro Zero (Giro Zero, 2022b) se ha señalado la falta de planeación, maduración y desarrollo de la infraestructura de recarga con energéticos de cero y bajas emisiones. La masificación de las tecnologías vehiculares cero emisiones no es posible sin una red de estaciones de carga para dichos vehículos (IEA, 2023). Como se ha señalado en otros GiroZero Policy Briefs, la adopción de vehículos de transporte de carga eléctricos en el país es baja y llegó a menos del 0.05% en 2021 y al 0.02% de las ventas en 2022, mientras que a nivel mundial 1.2% de los nuevos vehículos de transporte automotor de carga fueron eléctricos y alrededor del 4% en China durante 2022 (IEA, 2023).

En lo que tiene que ver con camiones eléctricos pesados la tecnología avanza con baterías de más amplio rango para que puedan viajar entre 450 y 500 kilómetros con una sola carga (Freightwaves, 2023). Sin embargo, la flota presente en Colombia corresponde en su mayoría a camiones livianos o medianos tal y como se señala en el catálogo de camiones (Giro Zero, 2023a). La electrificación de vehículos del sector transporte automotor de carga se viene dando en fases, en la primera de ellas se realizará en viajes de corta distancia con camiones rígidos livianos y medianos y posteriormente se extenderá a viajes regionales y de larga distancia involucrando camiones articulados pesados (Giro Zero, 2022b).

Un elemento crítico en la adopción de vehículos eléctricos es en diferentes operaciones es el tiempo de carga en comparación a la duración del proceso de tanqueo con otras tecnologías disponibles, dado que este tiempo puede impactar de forma relevante a la productividad de un camión o una flota de camiones. La carga de un camión eléctrico se realiza usualmente con un cargador de corriente directa que se conecta a la red de energía y existen distintos métodos para realizar dicha recarga: Carga nocturna de entre 50 y 100 kW, que toma usualmente entre seis y ocho horas para recargar un vehículo; el segundo método se refiere a la carga en destino que se localiza en infraestructuras logísticas especializadas, con el uso de cargadores de entre 150 y 400 kW, que permiten una carga rápida de entre una y dos horas mientras realizan operaciones de cargue y descargue y el tercer tipo es la carga en movimiento que corresponde a las catenarias donde los camiones son cargados en movimiento entre 500 y 1200 kW (Speth, 2022).

Los esfuerzos del Gobierno de Colombia para cuantificar y priorizar la demanda de infraestructura de recarga para el sector Transporte Automotor de Carga (TAC)

En Colombia el Gobierno Nacional ha realizado distintos esfuerzos en lo que respecta a políticas públicas orientadas a promover no solo la movilidad eléctrica sino la infraestructura de recarga:

a. Plan Nacional de Desarrollo

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia potencia mundial de la vida”, establece en sus bases que se crearán incentivos y fuentes de pago o mecanismos de financiación para infraestructura de carga. Adicionalmente, en la Ley 2294 de 2023 se establece la creación del fondo para la promoción de ascenso tecnológico que incluye vehículos de carga livianos, pesados y volquetas, así como la infraestructura de recarga, cuyas subcuentas se encuentran en estructuración y operativización actualmente (DNP, 2023b).

b. Leyes, decretos y resoluciones

Ley 1964 de 2019: Establece unas cuotas mínimas de estaciones de carga rápida a ser promovidas por los municipios de categoría especial y la capital colombiana, excepto Tumaco y Buenaventura, además de autorizar el uso de espacio público, entre otros, para estaciones de carga

que se pueden materializar a partir de la ampliación de estaciones de combustible tradicionales.

Ley 1972 de 2019: Establece en su artículo cuarto que desde del 1 de enero de 2023 las fuentes móviles terrestres con motor diésel que se fabriquen, ensamblen o importen al país, con rango de operación nacional, tendrán que cumplir con los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes al aire correspondientes a tecnologías Euro VI, su equivalente o superiores. Adicionalmente, en su artículo quinto establece que aquellos vehículos diésel que no cumplan con los anteriores estándares solo podrán circular hasta el 31 de diciembre de 2034.

Ley 2099 de 2021: Establece exenciones del pago de la contribución de solidaridad y redistribución de ingresos a estaciones de carga pública y se reglamenta a través de la Resolución 40362 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía³.

Resolución 40177 de 2020: Los Ministerios de Minas y Energía y Ambiente y Desarrollo Sostenible, definen los energéticos de cero y bajas emisiones y como cero emisiones define la energía eléctrica para la movilización de vehículos.

Resolución 40223 de 2021: El Ministerio de Minas y Energía establece las condiciones mínimas de estandarización para la implementación de infraestructura de carga para vehículos eléctricos enchufables. La norma establece los

3 Establece entre los beneficiarios a los usuarios comerciales, y los usuarios industriales, que posean u operen una estación de carga.

4 *Distancia promedio de viajes de transporte público de carga de acuerdo con los análisis del dashboard Proyecto Giro Zero*
<https://girozero.uniandes.edu.co/herramientas/dashboard> entre 2019 y 2023.

estándares mínimos de conectores para estaciones de carga, el sistema de registro e información de prestadores del servicio de carga eléctrica separa la actividad de carga eléctrica de la prestación del servicio domiciliario de energía y encarga a la Comisión de Regulación de Energía, y Gas (CREG) de establecer las señales de transacción y condiciones especiales de los equipos de carga.

Resolución 0763 de 2022: El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamenta los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres y se establece el procedimiento del certificado de emisiones en prueba dinámica y estática.

Resolución 40123 de 09 de abril de 2024: El Ministerio de Minas y Energía establece las condiciones de interoperabilidad de las estaciones de carga de vehículos eléctricos de acceso público. Donde los diferentes prestadores del servicio de carga para vehículos eléctricos garanticen la interoperabilidad, accesibilidad, disponibilidad y calidad de los servicios de carga. Además, indican que los operadores deben habilitarse previo a la prestación del servicio y reportar los documentos solicitados en la plataforma tecnológica y la resolución 40223 de 2021.

c. Documentos CONPES

Política de transición energética, CONPES 4075 de 2022: Tiene en cuenta la estrategia de movilidad eléctrica en

lo que se refiere al sector transporte y establecen la necesidad de estructurar el fondo de ascenso tecnológico por parte del Ministerio de Transporte.

Política de crecimiento verde, CONPES 3934: Incluye en una de sus líneas de acción la necesidad de establecer un programa nacional de electrificación del transporte que incluya la generación de reglamentos técnicos para la infraestructura de abastecimiento, suministro y operación del transporte eléctrico, así como parámetros mínimos para los vehículos eléctricos para tener en cuenta en sus procesos de ensamble e importación.

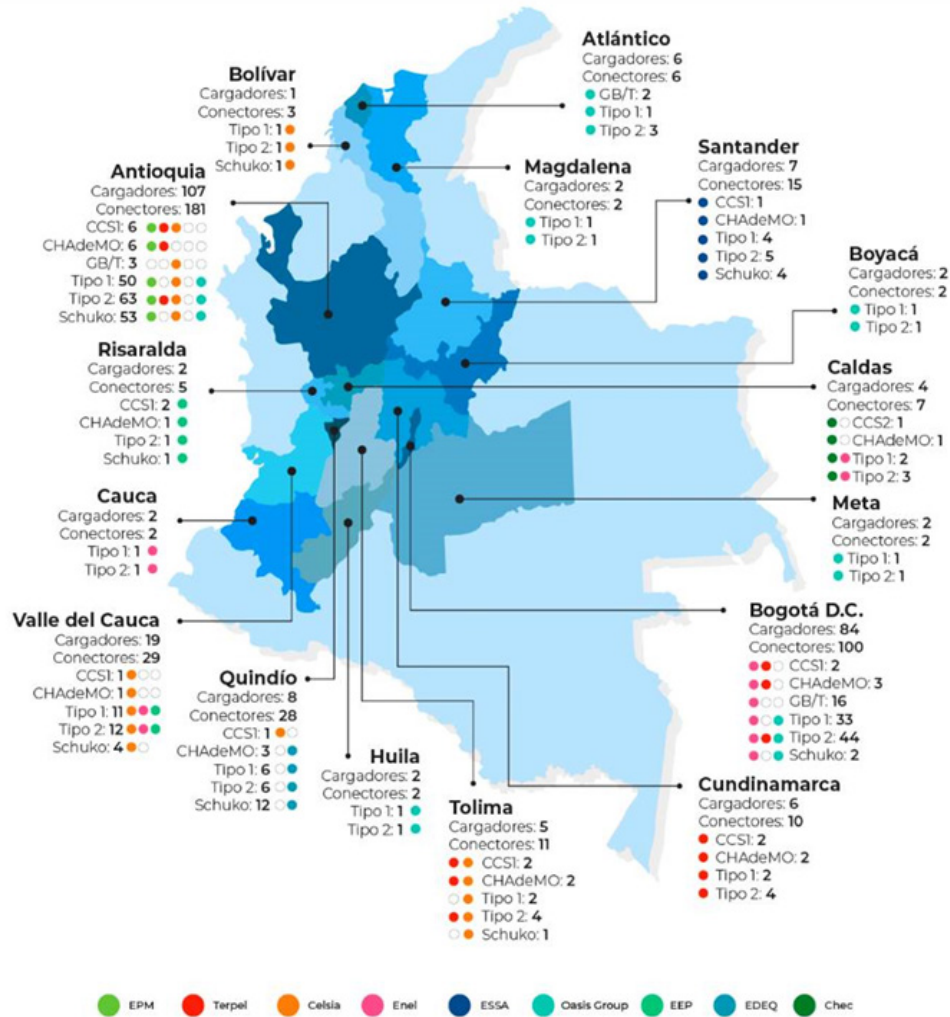
Pese a los anteriores esfuerzos, a marzo de 2024, los principales corredores viales y nodos logísticos aún no cuentan con una oferta adecuada en términos de cantidad y disponibilidad de estaciones de carga para electricidad u otros energéticos de cero emisiones (Mapa 1). Esta ausencia dificulta la adopción de camiones eléctricos, hidrógeno u otras tecnologías que lleguen a desarrollarse a escala comercial, para distancias mayores a 350 kilómetros⁴. Además, el DNP identificó que a finales de 2021 existían 119 estaciones de carga públicas, 259 cargadores y 405 conectores en total de los cuales 151 son tipo 1⁵ y 117 tipo 2⁶ y que la mayor concentración de estaciones se encuentra en Antioquia y Bogotá (DNP, 2022).

4 Distancia promedio de viajes de transporte público de carga de acuerdo con los análisis del dashboard Proyecto Giro Zero <https://girozero.uniandes.edu.co/herramientas/dashboard> entre 2019 y 2023.

5 Corresponden a conectores de 7 kW para carga lenta.

6 Corresponden a conectores de 11 kW para carga lenta y 43 kW para carga rápida.

Mapa 1: Estaciones de Recarga Eléctrica en Colombia



Fuente: (DNP, 2022).

Los distintos proveedores corresponden a compañías que prestan el servicio de carga eléctrica, empresas que venden combustibles líquidos y a startups que tienen como línea de negocio la publicidad y de manera alternativa ofrecen servicios de recarga eléctrica. Sin embargo, dichas empresas también identificaron como barrera que los cargadores se hayan estandarizado, pero no el cargador con el que deben importarse o ensamblarse los vehículos de transporte automotor de carga y señalan así mismo que el alto costo de instalación de un cargador es uno de los impedimentos para su rápida adopción (DNP, 2022).

Es así como se hace necesario contar con un modelo que permita la estimación de la demanda de energía eléctrica a partir de información de intensidad de uso de los corredores carreteros y de la necesidad de renovación de la flota.

Conceptualización de un modelo metodológico para la priorización de corredores de transporte de carga terrestre para la infraestructura de carga eléctrica

GiroZero propone un modelo de cinco etapas para la priorización de corredores de transporte de carga terrestre (TAC) para la infraestructura de recarga eléctrica. Cada etapa involucra se basa en un modelo matemático (Gil et al., 2024)) que permita hacer uso intensivo de la información y datos existentes en el sector de TAC en Colombia, respondiendo cada etapa a un propósito específico. A continuación, se describen cada una de estas etapas y posteriormente son presentados los resultados.

1. La etapa de **priorización de regiones** para electrificación del TAC determina un conjunto de corredores de carga a ser priorizados, los cuales concentran el mayor consumo energético en la red de transporte. Un corredor de carga es el conjunto de arcos que unen las ciudades principales de dos regiones del país, estos arcos integran total o parcialmente múltiples rutas con requerimientos futuros de infraestructura de recarga eléctrica.
2. En la **etapa de definición de fases de implementación electrificación** entre regiones

priorizadas, la longitud de cada corredor priorizado es dividido en lo que se denominan fases. Una fase tiene una longitud continua de la ruta del corredor al cual pertenece y un periodo de implementación. Se propone la electrificación en lapsos de 5 años, con inicio en el año 2025 y finalización en el año 2050 (año meta de la descarbonización total del TAC). Esto se traduce en 5 fases de implementación, donde la longitud de cada fase es estimada como la distancia en el corredor que balancea la energía requerida entre todas las fases para una transición escalonada y una evolución ordenada de la red de energía eléctrica actual. La energía de una fase es la suma de la carga requerida por todos los vehículos que atravesarán esa porción de corredor.

3. La siguiente **etapa es la localización de estaciones** de recarga a lo largo del corredor en cada dirección, una estación de recarga al ser establecida automáticamente se circunscribe temporal y geográficamente a una fase de implementación, existen múltiples restricciones: autonomía de los vehículos, distancia máxima entre estaciones de recarga, servicio multipropósito (transporte nacional y urbano), distancia de conexión a la red de carga entre otras. Estas restricciones deben ser abordadas simultáneamente

en pro de del nivel de servicio para el sector TAC.

4. En la **etapa de caracterización de estaciones de carga** se definen las capacidades en términos del número de puntos de recarga de las estaciones de carga. Un punto de recarga es la conexión directa de un vehículo a la red eléctrica. Una conexión tiene como característica la potencia de carga, la cual determina el tiempo de recarga total de la batería de un vehículo y es directamente proporcional a su costo de adquisición, pero por otro lado representa una compensación con el nivel del servicio. Para un cierto nivel deseado conexiones rápidas derivan en un menor número de puntos de recarga y consecuente menores necesidades de terreno y el costo asociado a ellos. Esta etapa examina las opciones de

potencia de carga y la cantidad de puntos de recarga que una estación debe proveer.

5. La **propuesta de aprovisionamiento de infraestructura eléctrica** propone el conjunto de la localización las estaciones de carga, la demanda de energía de cada uno de estos puntos, las capacidades de una estación de carga y un nivel de servicio esperado configuran una provisión mínima de infraestructura de recarga eléctrica en el país, siendo la última etapa de esta propuesta metodológica. El resultado definitivo entregado es el computo de la cantidad de puntos de recarga de cada estación en cada fase (momento de tiempo) en cada dirección de un corredor para vehículos ligeros y medianos de carga.

Figura 1. Modelo para la priorización de infraestructura de carga en corredores de transporte automotor de carga



Fuente: elaboración propia.

Etapas del modelo detallado para camiones C2 en Colombia

Identificación del corredor priorizado

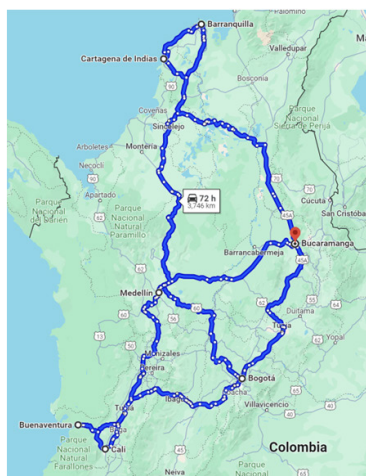
Según el Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC), en Colombia existen alrededor de 40.000 rutas (transporte de carga entre dos municipios), que pueden modelarse con un grafo de unos 17.000 arcos. Ante la inviabilidad de realizar un proceso ambicioso de infraestructura de electrificación que cubra todas las rutas de manera inmediata, se deben definir y evaluar planes de implementación que permitan la descarbonización gradual de la flota.

Se formuló un modelo matemático donde se selecciona el subconjunto de regiones que concentran el mayor número de movimientos de carga en la red de transporte⁷. Como resultado del modelo antes descrito, se identifica un clúster compuesto por Bogotá D. C. y seis de los 32 departamentos

del país: Cundinamarca, Antioquia, Valle del Cauca, Bolívar, Atlántico y Santander (Mapa 2, lado derecho), en los cuales es vital enfocar los esfuerzos iniciales de electrificación en Colombia. En adelante, dada su confluencia geográfica, las duplas Bogotá D.C – Cundinamarca y Bolívar – Atlántico, representarán dos regiones únicas en el análisis del clúster.

Con base en la información del RNDC del año 2023 para de vehículos de transporte de carga tipo C2, también referenciados como vehículos ligeros y medianos en Colombia, los movimientos de carga internos (entre municipios que pertenecen a la misma región) para las cinco regiones mencionadas suman un 38.05% de los kilómetros recorridos en el país y un 19.58% adicional de los kilómetros recorridos entre regiones. Las rutas abarcadas por estas cinco regiones acumulan el 57.63% de kilómetros recorridos con carga en Colombia para este tipo de vehículos.

Mapa 2. Rutas de regiones priorizadas



Fuente: Google maps y elaboración propia a partir de datos RNDC.

Es de resaltar que entre este conjunto de regiones se encuentran contenidos los dos principales puertos marítimos del país: Valle del Cauca (con la zona portuaria de Buenaventura) y Bolívar (con la zona portuaria de Cartagena). Sus movimientos de carga hacia la región de Cundinamarca- Bogotá D.C., son el par de regiones con mayor aporte en número de movimientos en el país para vehículos de carga ligeros y medianos, representando un 24.72% (Ministerio de Transporte, 2023).

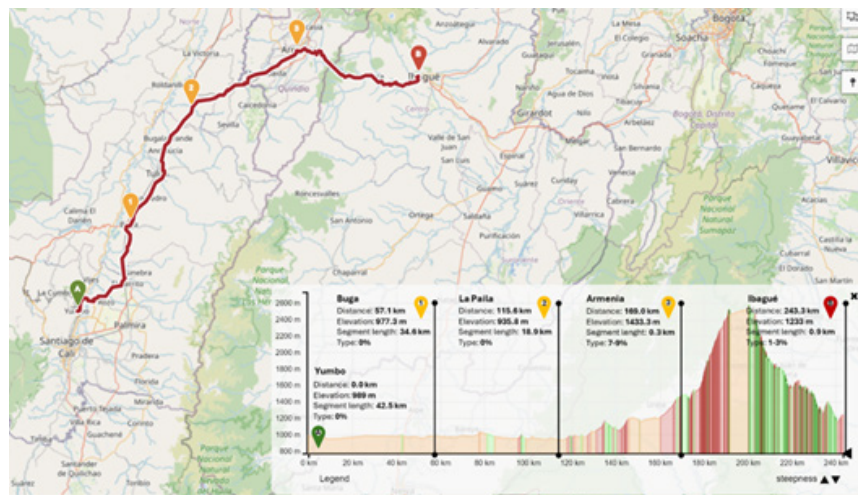
El flujo de vehículos de carga ligeros y medianos desde la región Valle del Cauca es 47.55% mayor hacia la región de Cundinamarca- Bogotá D.C. en comparación con el flujo reportado desde la región Bolívar – Atlántico (incluyendo los movimientos hasta la región de Antioquia). Adicionalmente, el corredor comprendido entre el Valle del Cauca y la región de Cundinamarca- Bogotá D.C., incluyendo el flujo entre municipios pertenecientes a la misma región, representa el 45.69% del flujo del

grafo de 7 corredores bosquejado en el Mapa 2. Por estas razones, este corredor será empleado para desarrollar las siguientes etapas de la metodología.

Definiendo las fases de implementación de la electrificación del transporte de carga en el corredor

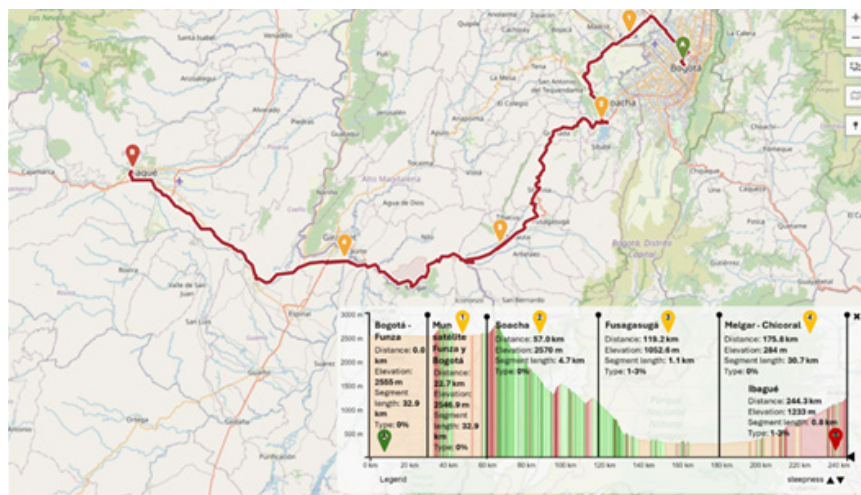
Los resultados de este modelo señalan el municipio de Yumbo (Valle del Cauca) y alrededores como el municipio ideal para trazar la dirección de expansión hacia los arcos que conectan con esta ciudad hacia Bogotá debido a su densidad de flujo, para plantear diferentes fases secuenciales de implementación de electrificación de infraestructura. Adicionalmente, este corredor presenta retos interesantes que involucran diversos tipos de terreno. En las Figuras 2 y 3 se presentan los hitos sobresalientes de las fases de implementación en ambos sentidos,

Figura 2. Fases de implementación Yumbo – Bogotá



Fuente: elaboración propia empleando Openroute services.

Figura 3. Fases de implementación Bogotá – Yumbo



Fuente: elaboración propia empleando Openroute services.

considerando condiciones de elevación del terreno.

El modelo indica el progreso de ciudades hacia las que se debe hacer expansión, tomando como partida el municipio de Yumbo, hasta llegar a Bogotá. Se establecen cinco fases cada una con un periodo de implementación de cinco años en ambas direcciones de la ruta: Yumbo – Bogotá y Bogotá – Yumbo, las cuales suceden de manera simultánea. El destino intermedio de la ruta es la ciudad de Ibagué. En sentido Yumbo – Bogotá, la primera fase abarca el municipio de Yumbo y sus alrededores; en la segunda se extiende hasta Buga; en la tercera hasta La Paila y en la cuarta hasta Ibagué, para continuar en la quinta fase el recorrido hasta Bogotá y su área de influencia cercana. En sentido Bogotá – Yumbo, la primera fase comprende Bogotá y su área de influencia cercana (municipios ubicados a distancia inferior a 30

kilómetros); en la segunda se extiende al área de influencia mediana de Bogotá (municipios ubicados a distancia mayor a 30 kilómetros y menor a 60 kilómetros); en la tercera hasta Fusagasugá y en la cuarta hasta Ibagué, para continuar en la quinta fase el recorrido hasta Yumbo.

Localización de estaciones de carga en la implementación de la electrificación del transporte de carga en el corredor priorizado

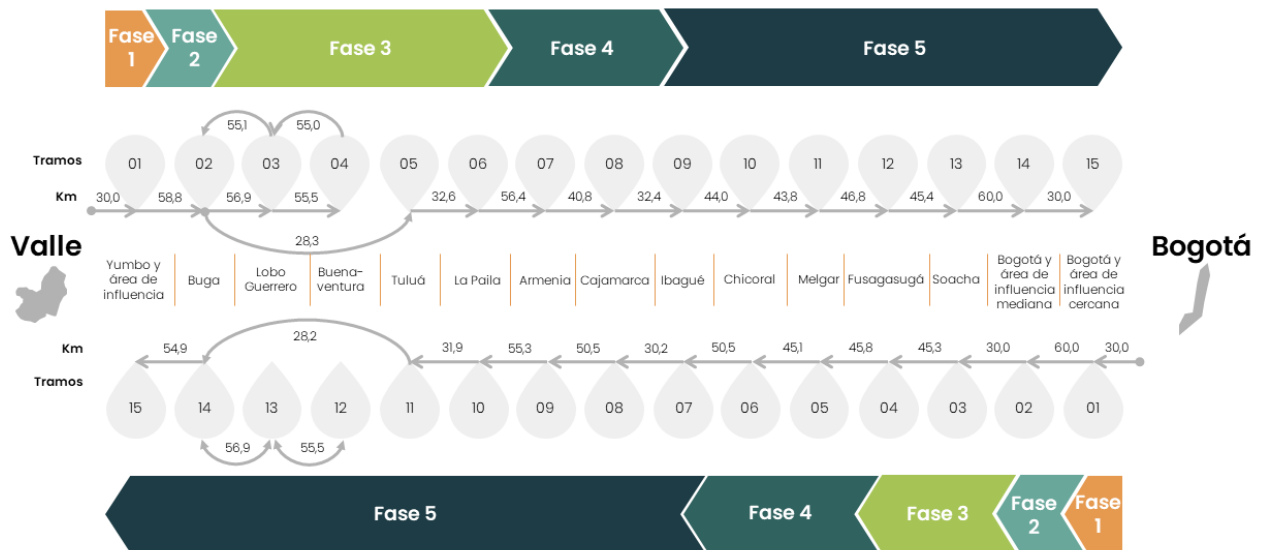
De acuerdo con las normas internacionales, debe disponerse de una estación de recarga máximo cada 60 kilómetros (C Iclodean et al, 2017). El siguiente desafío que emerge consiste en definir la localización de estaciones de recarga eléctrica en el corredor seleccionado (Electromaps, 2023). Esta restricción conduce a la necesidad del estudio cuidadoso de

las fases de implementación sugeridas por el modelo, con el propósito de minimizar impactos en la red eléctrica del país y generar sinergias futuras para la descarbonización total de la red, ya que esta metodología se basa en la priorización de corredores de transporte del país definiendo las fases en torno a la demanda de consumo energético y su proyección.

Se propone ubicar estaciones de recarga en 15 localizaciones que aseguran el cumplimiento de restricciones técnicas y lineamientos internacionales, según se muestra en la Figura 4. Estas localizaciones corresponden a Yumbo y su área de influencia, Buga, Lobo Guerrero, Buenaventura, Tuluá, La Paila, Armenia, Cajamarca, Ibagué, Chicoral, Melgar, Fusagasugá, Soacha, Bogotá y su área de influencia mediana y Bogotá y su área de influencia cercana.

(Corregimiento de Zarzal), Armenia, Cajamarca, Ibagué, Chicoral, Melgar, Fusagasugá, Soacha y Bogotá y su área de influencia mediana y cercana. Los tramos que configuran estos puntos son recorridos de manera secuencial en el sentido Valle del Cauca – Bogotá y, de manera inversa, en el sentido Bogotá – Valle del Cauca. Sin embargo, la cobertura de Buenaventura en la ruta da lugar a ciertas variaciones en la secuencia. Dadas las buenas condiciones de la vía, para llegar a Buenaventura desde Buga resulta conveniente hacerlo a través de Lobo Guerrero, lo que luego implica regresar a Buga para avanzar hacia Tuluá. En el sentido opuesto (Bogotá – Valle del Cauca), la secuencia desde Tuluá hasta

Figura 4. Localización geográfica de estaciones de carga



Fuente: elaboración propia.

Buga, pasando por Buenaventura, sería de la siguiente manera: Tuluá – Buga – Lobo Guerrero – Buenaventura – Lobo Guerrero – Buga, para finalizar la ruta en Yumbo y su área de influencia.

Caracterización de las estaciones de carga, cálculo de capacidades y requerimientos

De las cinco fases de implementación propuestas en la etapa anterior se deriva la necesidad de instalación de 15 de puntos (zonas) de recarga rápida en cada dirección del corredor entre Valle del Cauca y Cundinamarca, con una demanda de carga equivalente de 15,35 millones de kilómetros para el año 2050 en vehículos de carga medianos y ligeros. La definición de un plan de implementación exige detallar las características de gradualidad y configuración de cada estación de recarga, de acuerdo con el comportamiento y las necesidades específicas de cada tramo. Para este propósito, se desarrolló un modelo de teoría de colas, con el cual se pretende conocer el número de servidores





(gradual y máximo) y las bahías de parqueo requeridas en cada estación de recarga, junto con una estimación de los indicadores de desempeño esperados si se implementara dicho modelo.

Se estableció una autonomía media por vehículo de 260 km por carga, con una capacidad de recarga máxima de 82 kWh, estableciendo una reserva de la batería del 20%. Del RNDC, se recopiló información sobre la frecuencia de viajes de cada tramo y la longitud de cada viaje y además se complementó con el cálculo realizado por Giro Zero del número de viajes vacíos efectivos en estas rutas.

El valor resultante es la necesidad anual de cubrir kilómetros que se cubren diariamente en un turno efectivo de 16 horas / día, de los cuales 2 horas/ día se presenta el 80% de la demanda de recarga.

En la Figura 5 se detallan los resultados del modelo de teoría de colas, empleando unidades de recarga lenta, media y rápida, de 75, 100 y 150 kW, respectivamente. Se especifica

Figura 5. Características de las estaciones de carga

	LENTA	MEDIA	RÁPIDA
 Carga (kWh) Energía entregada por hora.	LENTA	MEDIA	RÁPIDA
 Servidores (Unidades) Número de estaciones requeridas para cumplir con un nivel de servicio mínimo del 95%.	LENTA	MEDIA	RÁPIDA
 Tiempo de carga (min) Tiempo requerido para cargarse en la estación.	LENTA	MEDIA	RÁPIDA
 Pico (kW) Potencia máxima requerida en una estación debido al estrés del sistema en horas pico.	LENTA	MEDIA	RÁPIDA

Fuente: elaboración propia.

el número de servidores requeridos para un nivel de servicio mínimo del 95%, el número de bahías de parqueo a provisionar según el número de vehículos que esperan para ser atendidos, el tiempo requerido de carga en el servidor (en minutos) y el tiempo promedio de espera cuando al llegar los servidores están ocupados. Adicionalmente, se calculan los máximos de kW en una estación por el alto flujo del sistema en horas pico, que debe abastecer la red de infraestructura para la flota de vehículos de carga ligeros y medianos con viajes realizados en las rutas que unen los departamentos del Valle del Cauca y Cundinamarca, a partir de información recopilada del año 2023.

Un punto de recarga es un vehículo estacionado incluyendo espacios de maniobra, pasillos y otros servicios. Para un flujo de vehículos y un nivel de servicio, estaciones con velocidades de recarga rápida requieren un menor número puntos de recarga en comparación con estaciones de carga media y lenta, por consiguiente, menos necesidad de terreno. Entonces, existe una compensación entre la necesidad de terreno y la velocidad de recarga.

Para ejemplificar se pueden comparar dos escenarios: el primero empleando puntos de carga lenta (75 kW) y el segundo con puntos de carga rápida (150 kW). La diferencia entre ambos puntos de carga es su velocidad, el doble en el caso de carga rápida respecto del de carga lenta. El incremento de velocidad no refleja un incremento en costo de iguales proporciones, las unidades de carga en el mercado con dos conexiones tienden a tener costos fijos altos, desde los cuarenta mil euros, y costos de

variables dependiendo de cada unidad de potencia entregado, entre 80 y 100 euros/kW, en otras palabras, entre 12,000 y 15,000 euros por cada unidad de expansión de capacidad de 150 kW de una unidad de recarga (75 kW para cada conexión). Lo anterior, representa un incremento en el costo de entre 23% y 29% para duplicar la capacidad de carga equivalente a 45% de reducción del tiempo de recarga completa de un vehículo. Por otro lado, a pesar del incremento en el costo de las unidades de carga se disminuyen el número de unidades necesarias para satisfacer la demanda pasando de 132 conexiones a 76 conexiones (con el mismo nivel de servicio), una disminución que también representa un 42,42% menor de requerimientos de área. Se puede concluir que el tipo de carga (rápida o lenta) de las estaciones de carga permite economías de escala cuando se integra en el análisis no solamente el costo (con ahorros del 28%) sino la infraestructura requerida para un nivel de servicio en particular.

Propuesta de aprovisionamiento de infraestructura eléctrica para atender la demanda identificada en el corredor priorizado.

Por último, en esta etapa confluyen la demanda y la capacidad de carga. La demanda calculada como la energía eléctrica requerida para que la flota de vehículos C2 recorran las diversas rutas que componen el corredor bajo análisis transportando carga mientras la capacidad define la velocidad de servicio (recarga), que atienden un flujo dinámico de vehículos y que debe garantizar no solo la energía sino un nivel de servicio, en término del número de puntos de conexiones

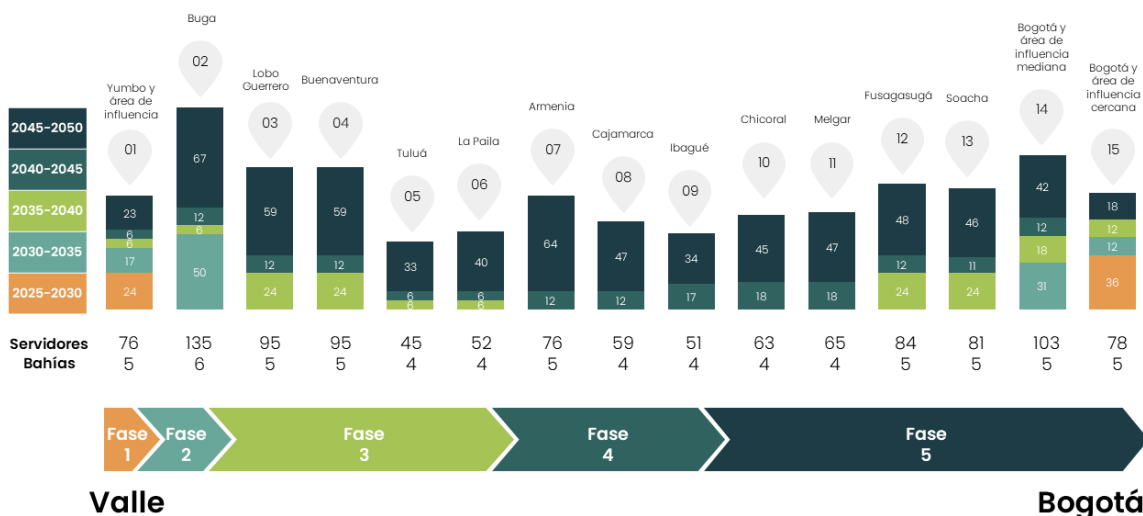
al sistema eléctrico. En este apartado, se da respuesta a este número para cada una de las localizaciones de recarga del corredor Valle del Cauca y Cundinamarca – Bogotá D.C. en ambas direcciones, evitando el aprovisionamiento de energía se convierta en el cuello de botella de la cadena de valor de cada compañía.

Las figuras 6 y 7 ilustran el desarrollo de puntos de recarga en cada dirección del corredor por fase de implementación incluyendo los viajes de retorno de la dirección opuesta. Aunque no se detalla cada zona de recarga y sus indicadores, estos cómputos se encuentran basados en el modelo de la etapa anterior. La información se proyecta para todas las fases de manera anticipada, para efectos de la proyección y adquisición de terrenos, de manera que se asegure la disponibilidad de espacio físico (que deben incluir pasillos de maniobra de

vehículos y otros espacios del servicio) a medida que se sumen servidores en las fases siguientes.

En cada localización de estaciones de carga se encuentra una barra hasta con 5 colores, que identifican cada una de las fases de implementación y la cantidad de servidores conexiones de recarga que requieren ser instalados en tal fase. Un corredor debe desarrollarse en ambos sentidos, dado que un vehículo viajando en una dirección con toneladas de carga retornara a su ciudad de origen, en este retorno se debe garantizar la infraestructura incluyendo si es un viaje vacío. Los servidores y bahías se refieren al número de conexiones y espacios de parque requeridos por la respectiva localización para el año 2050.

Figura 6. Progresión de instalación de servidores en la ruta Valle – Bogotá



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior es posible ver la progresión de la infraestructura de carga en el sentido Valle del Cauca Bogotá. En este caso, la provisión de servicios inicia en el quinquenio 2025-2030 con 24 servidores en el área de Yumbo, Valle del Cauca y 36 servidores en Bogotá durante la fase 1. En los siguientes quinquenios (fases), el desarrollo de infraestructura de recarga

se extiende hacia otros municipios de la ruta Yumbo/Buenaventura – Bogotá en donde más municipios se van incorporando con el paso del tiempo y la progresión de infraestructura de recarga va aumentando progresivamente conforme se alcanzan mayores distancias y mayor proporción de la flota de camiones C2.

Figura 7. Progresión de instalación de servidores en la ruta Bogotá – Valle



Fuente: elaboración propia.

En el sentido contrario, es decir Bogotá – Valle del Cauca el desarrollo de infraestructura de carga se mantiene creciente con la distancia y la entrada en operación de un mayor porcentaje de la flota de camiones C2 pero la cantidad de servidores y bahías de servicio cambia ligeramente mostrando un menor balance si se compara con la ruta Valle del Cauca – Bogotá. En este caso, la inversión del desarrollo de infraestructura de recarga se hace principalmente en la fase 5 entre 2045 y 2050.

Simulando la demanda mínima de puntos de recarga para transporte de carga en camiones C2 en 2050

La descarbonización del país requiere de esfuerzos mayúsculos las próximas dos décadas. Aunque en términos de conversión a energías renovables, en este caso electrificación de vehículos de carga ligeros y medianos, el 57.63% de kilómetros recorridos con carga en Colombia se encuentran concentrados en 7 corredores que comunican 5 regiones del país la meta propuesta

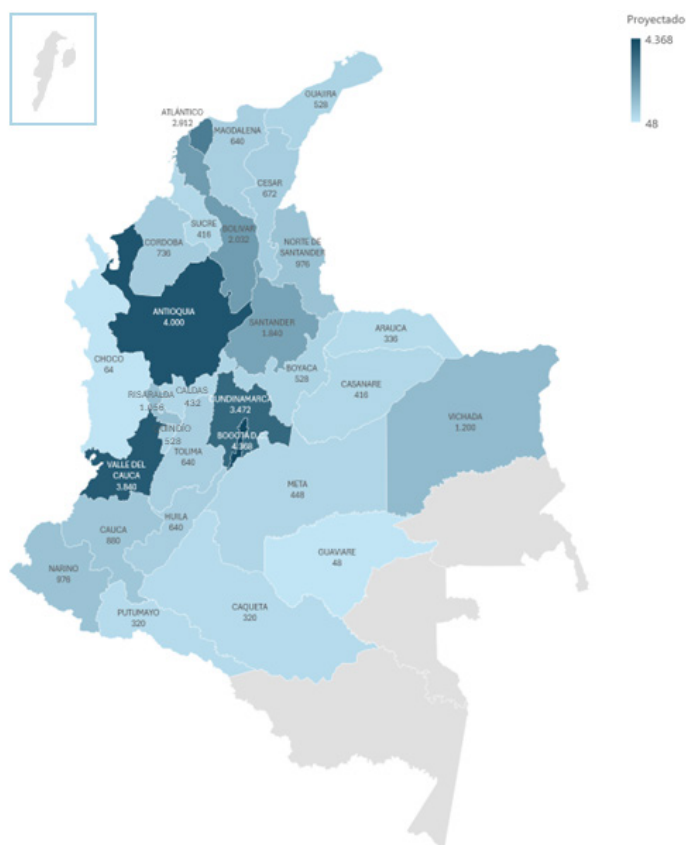
en la COP26 se estableció en 100% de reducción de emisiones para el año 2050. Siendo entonces necesario la transformación energética del transporte de carga en la gran mayoría de municipios del país en las próximas 3 décadas.

Es importante entonces traducir la meta de la COP26 en metas cuantificables, acotadas y con plazos en términos de infraestructura y de parque automotor, dada la naturaleza de este documento en esta sección estimamos el número mínimo de puntos de recarga en cada departamento del país para vehículos tipo C2 para que autoridades

y formuladores de política pública desacoplen esta meta a acciones a corto y mediano plazos.

La Figura 11 presenta el número mínimo de puntos de recarga eléctrica por departamento para el año 2050 para vehículos tipo C2 en Colombia. El cálculo se realiza con base en el flujo reflejado en el RNDC en el año 2023 para este tipo de vehículos en la red de carreteras actual, con un crecimiento medio de 2.6% anual del tamaño de flota y las capacidades propuestas en la etapa de caracterización de las estaciones de carga.

Mapa 3. Puntos de recarga proyectados para el año 2050



Fuente: elaboración propia.

El mapa muestra la concentración de puntos de carga en tres departamentos (Valle del Cauca, Antioquia, Cundinamarca) y Bogotá, que responde a la concentración de las industrias y los centros poblados de mayor envergadura en el país, adicionalmente aquellas regiones que conectan dichas ciudades entre sí y con los puertos del Caribe representan la segunda mayor proporción de puntos de carga. Los departamentos restantes muestran una menor distribución al verse alejados de los grandes centros poblados o de los principales corredores de carga.

Es de resaltar que la mayor demanda de puntos de recarga se encuentra sobre los departamentos atravesados por el sistema montañoso colombiano, basados en la resolución 20213040034405 de 2021 del Ministerio de transporte, vehículos ligeros y medianos de carga llegan a perder hasta 38.50% del número de kilómetros recorridos por un galón de combustible, y en vehículos de carga pesados esta reducción llega a ser hasta un 49.69%. Esta ineficiencia es la adicional requerida por el motor del vehículo para afrontar inclinaciones que frecuentemente superan los 15 grados además de los kilómetros adicionales debido a las curvas para sortear el relieve montañoso en las rutas. Intensificado por otro lado, por ser las regiones que agrupan mayor flujo de movimiento de vehículos en el país.

Al mismo tiempo, lo anterior plantea la existencia de un inicio diferente a la descarbonización: aquellas regiones de fuera del relieve montañoso, de demanda reducida y pocos sectores industriales concentrados en su territorio. Permitiendo la colaboración,

la transformación paralela de la infraestructura y el parque automotor, menores necesidades de inversión de capital y maximizando curvas de aprendizaje para el resto del país.

Propuestas de Giro Zero para acelerar la oferta de infraestructura de recarga en el mediano plazo

Primera Propuesta: Extender y usar el modelo para la priorización de corredores de transporte de carga teniendo en cuenta la demanda de energía por electrificación del transporte de carga

Actualmente no existe una herramienta de modelación de la demanda a partir de datos de intensidad de uso de los corredores nacionales y tampoco se ha priorizado la planeación de infraestructura de carga eléctrica a partir de renovación de la flota de transporte automotor de carga junto con la entrada de la tecnología en las décadas siguientes. Por tanto, se propone profundizar el uso del modelo propuesto en el presente Policy Brief para la toma de decisiones basada en evidencia y extenderlo a otros corredores de vías nacionales y departamentales.

Segunda propuesta: Unir demanda y oferta de energía eléctrica renovable

La recomendación consiste en incorporar, cuando el nivel de información disponible lo permita, la oferta de energía eléctrica para los corredores identificados con el fin de contrastarla con la demanda e identificar posibles cuellos de botella

por falta de infraestructura eléctrica e interconexión con las estaciones de carga. Todo lo anterior permitiría agilizar los procesos de abastecimiento de infraestructura de carga respondiendo a la demanda y promover así la adopción de vehículos de cero emisiones en el transporte automotor de carga. Para lo anterior el sector transporte y el sector minas y energía pueden trabajar de manera conjunta, en promover el uso de sistemas de información que permita cruzar la demanda de transporte con la oferta de energía eléctrica renovable a partir de sinergias entre las unidades de planeación sectoriales y sus modelos.

Tercera Propuesta: Evaluar la localización de posibles puntos de infraestructura de recarga haciendo uso de infraestructura existente

Para establecer la localización exacta de infraestructura de recarga eléctrica se deben tener en cuenta adicionalmente a los factores expuestos anteriormente, la localización de estaciones de servicio existentes, zonas de descanso, parqueaderos y otras facilidades que puedan ser usadas para este fin y hagan uso de la infraestructura.

Limitaciones

El enfoque presentado no toma en cuenta otros tipos de vehículos diferentes a la categoría C2, como por ejemplo vehículos de pasajeros públicos y privados o vehículos de carga de otras categorías. Conocer el comportamiento e involucrarlo en la toma de decisiones de la transición energética genera sinergias operativas en la infraestructura, una mayor utilización en horarios valle u horarios diferenciados, permitiendo que los costos de capital por kW distribuido disminuyan.

Este modelo no ahonda en los cambios estructurales en la decisión del conjunto de rutas que un vehículo atiende si es reemplazado por un activo con un nuevo energético o no. Si en este caso un vehículo de combustión interna se reemplaza por un vehículo eléctrico, el conjunto de rutas que puede atender el vehículo queda restringido a aquellas que suministren la energía de manera temporal y geográfica.

El análisis de la compensación entre las dimensiones de terreno y la velocidad de recarga no es abordado en este documento. No obstante, se considera que velocidades de recarga altas que lleguen a equiparar a las actuales estaciones de servicio son



Este modelo no ahonda en los cambios estructurales en la decisión del conjunto de rutas que un vehículo atiende si es reemplazado por un activo con un nuevo energético o no. Si en este caso un vehículo de combustión interna se reemplaza por un vehículo eléctrico, el conjunto de rutas que puede atender el vehículo queda restringido a aquellas que suministren la energía de manera temporal y geográfica.

relevantes, eventualmente un número limitado de estaciones de carga, un número limitado de puntos de recarga en cada estación y una velocidad de recarga no adecuada ocasionan una mayor inversión de vehículos y otros activos adicionales para mantener el nivel de servicio a sus clientes.

Los próximos años las regiones del país evolucionarán económica de diversas maneras, algunos impulsarán su oferta de productos y servicios mientras otros crecerán en consumo, estos comportamientos se reflejarán en el transporte de carga entre regiones. Actualmente, no existe evidencia clara como este comportamiento evolucionará en las próximas décadas por ello comportamiento del sector TAC

en Colombia es proyectado constante tanto temporal como espacialmente. Esto significa que la concentración de viajes entre las diferentes regiones del país se consideró constante hasta el año 2050.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar la discusión sobre los costos y beneficios de la electrificación, las fuentes de financiación del plan de construcción y operación de infraestructura de recarga, y las medidas necesarias para garantizar una implementación justa y equitativa. Lo anterior permitirá cuantificar, priorizar e incentivar la inversión en este tipo de infraestructura.



Fuente de la imagen: Ministerio de Transporte

Referencias

- Bhatnagar, S. (16 de Agosto de 2003). Transparency and Corruption: Does E-Government Help? . New Delhi: Indian Institute of Management. Obtenido de <https://www.weforum.org/agenda/2021/08/how-to-decarbonize-heavy-duty-transport-affordable/>
- C Iclodean et al. (17 de Abril de 2017). Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. 252. Obtenido de El Container: https://www.colfecar.org.co/wp-content/uploads/220_ELCONTAINERabril.pdf
- DANE. (2023). Cuentas Nacionales Anuales.
- DNP. (2020). Política Nacional Logística, Documento CONPES 3982 . Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- DNP. (2022). Identificación de modelos de negocio y estructuración de hojas de ruta de implementación, para el desarrollo de la red de estaciones de carga pública a nivel nacional y la estructuración de proyectos piloto en Colombia. Bogotá: DNP.
- DNP. (1 de Diciembre de 2022). Sinergia. Obtenido de PND: Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad. Seguimiento indicadores: <https://sinergiapp.dnp.gov.co/>
- DNP. (Mayo de 2023a). Ley 2294. Gaceta del Congreso.
- DNP. (2023b). Bases del PND 2022-2026 Colombia Potencia Mundial de la Vida. Bogotá: DNP.
- Drive to zero, G. c. (26 de Abril de 2022). Global memorandum of understanding on zero emission medium and heavy duty vehicles. Obtenido de MOU: <https://globaldrivetozero.org/site/wp-content/uploads/2021/12/Global-MOU-ZE-MHDVs-signed-20-Dec-21.pdf>
- Electromaps. (15 de May de 2023). Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR). Obtenido de <https://www.electromaps.com/en/blog/fast-charging-points-60-km-europe-main-roads>
- Freightwaves. (16 de Junio de 2023). As electric truck batteries evolve, it's all about the range. Obtenido de Freight waves: <https://www.freightwaves.com/news/as-electric-truck-batteries-evolve-its-all-about-the-range>
- Gil, C., Martinez, G. & Wilmsmeier, G. (2024) Charging infrastructure planning for fleet renewal in Colombia. Universidad de los Andes. Colombia. Working paper
- Giro Zero. (2021). Industry Review Report .
- Giro Zero. (2021b). Plan estratégico de negocios. Bogotá: Giro Zero. Obtenido de <https://girozero.uniandes.edu.co/en/tools/scenarios-simulator>
- Giro Zero. (2022). Plan Estratégico de Negociación- Proyecto Giro Zero. Universidad de los Andes. Obtenido de <https://girozero.uniandes.edu.co/publicaciones/plan-de-negocios/documento>
- Giro Zero. (31 de Julio de 2022a). Policy Brief A: Metas y retos después de la COP 26 para el Transporte Automotor de Carga en el camino hacia cero emisiones. Obtenido de Investigaciones: <https://girozero.uniandes.edu.co/node/101>

- Giro Zero. (2022b). Giro Zero Road Map: Dirigiendo el sector transporte automotor de carga en Colombia hacia las cero emisiones. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes – Cardiff University.
- Giro Zero. (2022c). ¿Qué barreras financieras dificultan la transición hacia cero emisiones en TAC? Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=sGtMY-X7h2U&t=5737s>
- Giro Zero. (2022c). ¿Quiénes Compran Vehículos de Cero y Bajas Emisiones? Estudio de Mercado, Bogotá. Obtenido de <https://girozero.uniandes.edu.co/node/103>
- Giro Zero. (1 de Febrero de 2023). Policy Brief B: Una visión para el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. Obtenido de Resultados: <https://girozero.uniandes.edu.co/publicaciones/investigaciones>
- Giro Zero. (25 de Julio de 2023a). Catálogo virtual. Obtenido de Toolbox: <https://girozero.uniandes.edu.co/herramientas/catalogo-de-camiones>
- Giro Zero. (2023a). Incentivos para la Adopción de Tecnologías de Cero Emisiones Alrededor del Mundo. Universidad de los Andes. Obtenido de https://girozero.uniandes.edu.co/system/files/2023-03/docs/Incentive_Schemes.pdf
- GIZ, P. T. (2021). Manual para el diseño de programas de renovación de flotas. México D.F: GIZ. doi:doi:10.1080/00036846.2018.1520963
- Gobierno de Colombia, C. N. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). (N. S. Climático, Ed., & G. d. Colombia, Recopilador) Bogota. Recuperado el mayo de 2021, de <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>
- Hernandez, C. E. (2022). Stops and Delays in Road Freight Transport: Variation across Trips, Trucks, Drivers, and Carriers. Mimeo. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1c9S2f146tUKTOvmDfGp62KasCINyyzC5/view>
- IEA. (2023). Global EV Outlook 2023. International Energy Agency.
- Ministerio de Transporte. (2021b). Proyecto de Resolución “Por la cual se reglamentan las tecnologías vehiculares de bajas o cero emisiones y se adoptan otras disposiciones”. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Uploads/PROYECTO%20RESOLUCION%20TECNOLOGIAS%20VEHICULARES%2021062021.pdf>
- Ministerio de Transporte. (2021b). Transporte en Cifras. Obtenido de <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/9443/transporte-en-cifras/>
- Ministerio de Transporte. (2023). Estadísticas y Avances del Programa de Modernización de Carga.
- Ministerio de Transporte. (2023). RNDC.
- Mintransporte. (2019). ABC del programa de renovación vehicular. Bogota: Ministerio de Transporte.
- Mintransporte. (18 de Abril de 2023). El transporte público de carga por carretera movilizó más de 135 millones de toneladas de mercancías en 2022. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Recuperado el 01 de 11 de 2022, de Giro Zero Project/tools: <https://girozero.uniandes.edu.co/en/tools/dashboard>

Mintransporte, M. d. (01 de noviembre de 2021). Ministerio de Transporte, publicaciones. Obtenido de Intermodalidad, transición energética y movilidad sostenible, las tres grandes acciones del sector Transporte en COP26: <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/10381/intermodalidad-transicion-energetica-y-movilidad-sostenible-las-tres-grandes-acciones-del-sector-transporte-en-cop26/>

Portafolio. (30 de Junio de 2023). Finanzas. Obtenido de El Banco de la República decidió mantener en 13,25 % las tasas: <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/banco-de-la-republica-emisor-mantuvo-las-tasas-de-interes-en-13-25-585255>

Revista Carga Pesada. (25 de Julio de 2023). Revista carga pesada. Obtenido de <https://revistacargapesada.com/>

RUNT. (30 de Abril de 2023). Bogotá: Mintransporte. Obtenido de transport-co2-paris-agreement-six-years-later.

Secop. (24 de Abril de 2022). Evaluación de operaciones y resultados de la Política para la Modernización del Sector Transporte Automotor de Carga. Obtenido de Procesos de contratación: <https://community.secop.gov.co/Public/Tendering/OpportunityDetail/Index?noticeUID=CO1.NTC.3385902&isFromPublicArea=True&isModal=False>

Speth, D. P. (2022). Public fast charging infrastructure for battery electric trucks—A model-based network for Germany. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2.

TIC, C. d. (2019). Modernizando la flota de camiones australiana. Canberra: Concejo de la industria de camiones. Obtenido de <https://girozero.uniandes.edu.co/en/tools/scenarios-simulator>

UPME. (2019). Infraestructura de recarga para la movilidad eléctrica en Colombia.

Sobre los autores:

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

- Gordon Wilmsmeier: Profesor Asociado y titular del “Kühne Professorial Chair in Logistics” Facultad de Administración.
- Cristiam Gil: Investigador Asociado, Universidad de los Andes—Kühne Logistics University, Hamburgo, Proyecto GiroZero.
- Gustavo Martínez: Investigador Asociado, “Kühne Professorial Chair in Logistics” Facultad de Administración.

En esta edición

- Gretty Acosta Arregocés: revisión, diseño y diagramación.