

RESUMEN EJECUTIVO:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS MODALES PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO

Introducción y Contexto del Proyecto

El presente documento constituye un resumen del primer entregable del análisis comparativo de alternativas modales para el sistema de transporte público de Montevideo, que ha sido encargado a las empresas REDES México – REDES Brasil – AIC Economía & Finanzas y desarrollado en el marco del Programa de Transformación del Sistema de Transporte Metropolitano (PTTMM). En los próximos meses se completará el trabajo, incorporando al análisis otras variables que aún no han sido consideradas en esta primera entrega.

El estudio se centra específicamente en dos de los ejes más relevantes para la movilidad metropolitana: el corredor 8 de Octubre - Cno. Maldonado y el corredor Av. Italia – Giannattasio, junto con la prolongación de ambos corredores en la Av. 18 de Julio. La motivación fundamental de esta intervención radica en la necesidad de revertir el deterioro progresivo de la velocidad comercial y la caída estructural de la demanda que ha afectado la sostenibilidad operativa y financiera del sistema en los últimos años.

El objetivo central de este trabajo es proporcionar elementos técnicos y analíticos que apoyen la toma de decisiones estratégicas, evaluando de manera integral las ventajas, limitaciones y condiciones de aplicabilidad de las principales tecnologías de transporte de mediana y alta capacidad en los ejes principales objeto de intervención. No se espera que el trabajo en sí mismo realice una recomendación sobre cual es la mejor tecnología a adoptar para los ejes seleccionados.

El análisis adopta un enfoque conceptual y sistémico, priorizando la perspectiva del usuario y el cumplimiento de los "deseos de viaje" de la población. Es importante destacar que este informe preliminar se basa en un riguroso ejercicio de *benchmarking* internacional y en el uso de literatura técnica especializada, de modo de poder realizar un comparativo de opciones sin constituir un estudio de factibilidad o ingeniería de detalle.

El análisis recorre tanto el contexto del Sistema de Transporte Metropolitano como de los corredores a intervenir; realiza una caracterización conceptual de alternativas modales y premisas de diseño para los corredores en estudio que desembocan en tres alternativas de modo para realizar el comparativo: BRT central confinado con flota biarticulada, Tranvía – LRT ligero de 290 pasajeros y Metro Ligero.

Se descartan del análisis comparativo otras tecnologías, que no se consideran adecuadas, o lo suficientemente probadas, o de nicho como el caso del Monorriel, sistemas de buses guiados o el Aerómovel.

El análisis comparativo de modos se realiza en base a las siguientes categorías: factibilidad técnica, física y operativa (disponibilidad de espacio, requerimientos de

infraestructura, densidad de cruces, nodos especiales), desempeño operacional (capacidad nominal, tiempos de espera, puntualidad y regularidad, complejidad operacional), impacto y adaptación al sistema de transporte existente y aspectos económicos y costos de implementación (CAPEX).

Caracterización de las Alternativas Tecnológicas

El estudio evalúa tres tipologías tecnológicas consagradas a nivel global: los Sistemas de Ómnibus de Tránsito Rápido (BRT), el Tren Ligero (LRT) y el Metro Ligero.

La definición de estas alternativas no se basa exclusivamente en el material rodante, sino en una configuración integral que incluye el grado de segregación de la vía, los requerimientos de infraestructura y los estándares operativos.

Factibilidad Técnica, Física y Operacional

La viabilidad de las alternativas modales está condicionada por la capacidad geométrica de los corredores para alojar infraestructura dedicada sin comprometer la funcionalidad del entorno.

El BRT requiere secciones transversales de aproximadamente 11 metros para carriles exclusivos y estaciones centrales, mostrando una alta compatibilidad con la red vial existente, aunque presenta restricciones en tramos densos como la Troncal 18 de Julio. El LRT (Tren Ligero), requiere secciones transversales de ancho similar, y si bien puede operar en tráfico mixto, requiere segregación física para mantener velocidades comerciales competitivas; su rigidez tecnológica sobre rieles limita las maniobras ante obstáculos externos. Por su parte, el Metro Ligero se proyecta bajo una premisa de segregación total (soterrado o elevado) debido a que la densidad urbana de los ejes analizados imposibilita una segregación total a nivel sin generar barreras urbanas infranqueables.

En términos de infraestructura, el BRT demanda obras civiles básicas (pavimento reforzado y estaciones de nivel), mientras que el LRT y el Metro exigen sistemas complejos de electrificación (catenaria), señalización ferroviaria y centros de mantenimiento vinculados rígidamente a la vía. Los nodos especiales, particularmente el intercambiador de Tres Cruces, representan el mayor desafío constructivo, requiriendo soluciones en varios niveles para integrar los tres corredores metropolitanos, con una complejidad técnica que escala significativamente en las opciones ferroviarias debido a los mayores radios de giro y menores pendientes máximas permitidas.

Desempeño Operacional y Capacidad

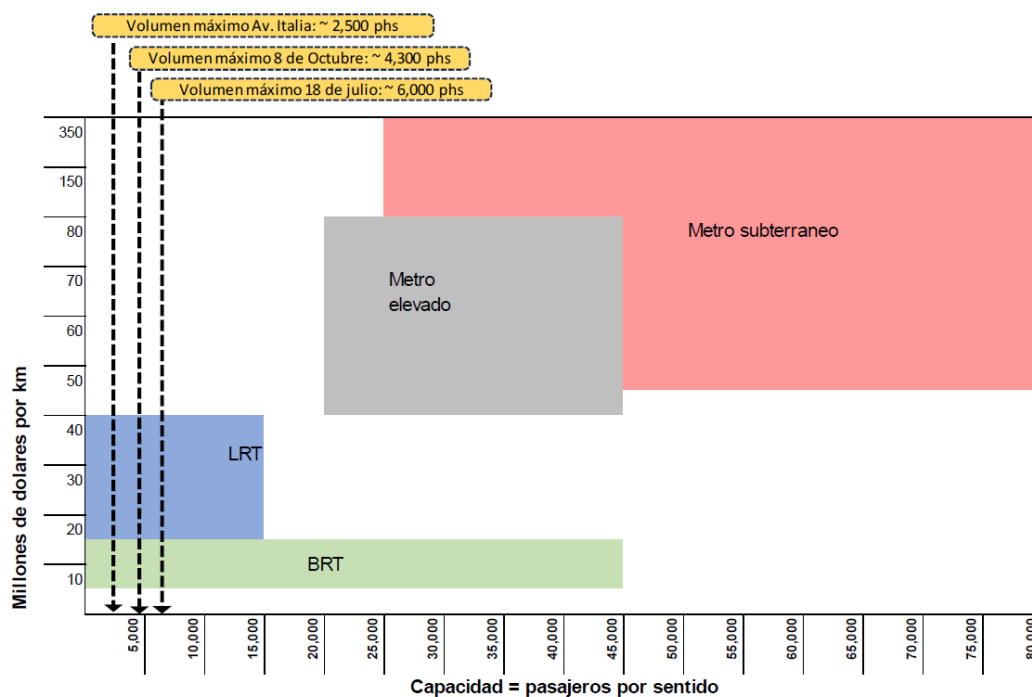
Uno de los pilares del estudio es la adecuación de la oferta tecnológica a la demanda actual y proyectada de los corredores. La capacidad nominal se define como el volumen máximo de pasajeros por hora por sentido (phs) bajo condiciones de confort aceptables.

Los datos relevados indican que el volumen máximo se registra en una sección de la Troncal 18 de Julio, alcanzando aproximadamente los 6,000 phs con la confluencia de ambos corredores, mientras que los corredores 8 de Octubre y Av. Italia registran 4,300 y 2,500 phs respectivamente.

El análisis de capacidad nominal confirma que todas las tecnologías pueden atender la demanda proyectada, aunque con distintos márgenes de crecimiento y eficiencia. El BRT, con una frecuencia de diseño de hasta 60 buses/hora, alcanza una capacidad máxima potencial de 11,200 phs, ofreciendo mayor versatilidad para ajustar la oferta en tramos de menor demanda. El LRT se sitúa en los 7,395 phs bajo un esquema de tranvía en superficie con prioridad semafórica, mientras que el Metro Ligero alcanza los 15,300 phs mediante altos niveles de automatización.

El análisis demuestra que para las demandas que se observan en los corredores propuestos, tanto la alternativa de BRT como la de LRT serían viables. Sin embargo, hay una diferencia importante en cuanto a los costos asociados en detrimento del LRT.

Figura 1. Capacidad de los sistemas de transporte y costos capitales para opciones de transporte masivo



Elaboración propia, con base en Guía ITDP, 2017

La confiabilidad del servicio (puntualidad y regularidad) está directamente vinculada al grado de segregación. El Metro ofrece el estándar más alto al eliminar interferencias externas, mientras que el BRT y el LRT en superficie dependen de la prioridad semafórica y son vulnerables a incidentes viales.

En cuanto a la velocidad comercial, las soluciones segregadas a desnivel permiten rangos de 25 a 40 km/h, frente a los 12-25 km/h esperados en soluciones a nivel con alta densidad de cruces.

Operacionalmente, los sistemas guiados (LRT/Metro) ofrecen un entorno más predecible y automatizado, mientras que el BRT requiere un control de flota más activo y complejo para gestionar la diversidad de rutas que interactúan en el corredor.

Impacto y Adaptación al Sistema Existente

La integración con la red actual varía según la flexibilidad de cada modo. El BRT permite esquemas operativos híbridos y una implementación gradual, facilitando la transición desde el sistema convencional de ómnibus. En contraste, el Metro y el LRT exigen una reestructuración inmediata y profunda de las líneas existentes para que funcionen como servicios alimentadores, evitando la competencia directa con la infraestructura troncal.

Finalmente, en materia de gobernanza, el BRT presenta una mayor viabilidad para la reconversión de operadores actuales, permitiendo la integración de la mano de obra existente bajo nuevos modelos empresariales. Las alternativas ferroviarias, por el contrario, suelen requerir concesiones a entidades especializadas con baja participación de los operadores tradicionales.

Factibilidad Técnica e Inserción Urbana

La viabilidad de cada alternativa está condicionada por la disponibilidad de espacio en las secciones viales existentes y la complejidad de los nodos críticos, siendo el intercambiador de Tres Cruces el punto de mayor exigencia técnica. El estudio revela que, en términos de requerimientos de sección vial, existen tramos donde la implementación de sistemas ferroviarios a nivel representaría un desafío mayor debido a las restricciones geométricas y la necesidad de radios de giro más amplios.

Asimismo, se evalúa el impacto de la densidad de cruces vehiculares y peatonales en la seguridad vial y el desempeño operativo. Los sistemas ferroviarios presentan distancias de frenado significativamente mayores que los sistemas basados en ómnibus, lo que obliga a intervenciones más profundas en la señalización y el control de tráfico en superficie. Por esta razón, se considera que, en los sectores más densos de la red, la segregación total (soterramiento o elevado) podría ser necesaria para garantizar los niveles de servicio deseados, independientemente del modo seleccionado.

Aspectos Económicos Preliminares y CAPEX

La dimensión económica del estudio establece órdenes de magnitud para los costos de inversión inicial (CAPEX) por kilómetro. A través de una base de datos de 93 proyectos internacionales, se han identificado diferencias paramétricas sustanciales entre las tecnologías.

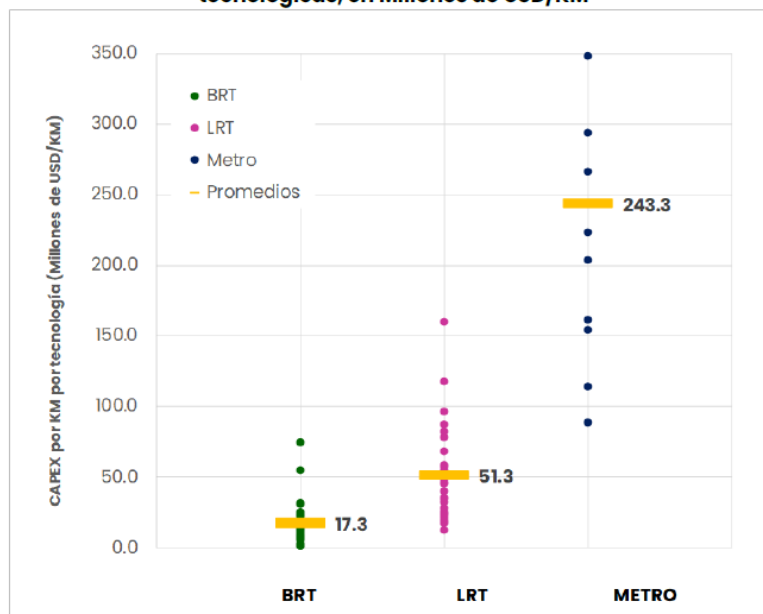
En cada una de las modalidades comparadas (BRT, LRT, Metro), existe variabilidad al interior de cada una de ellas en cuanto a costos de implementación, por el diferente tipo de proyecto que se pueden desarrollar. Así, un BRT puede tener un costo de implementación de USD 5 mill por kilómetro o USD 15 mill por kilómetro, dependiendo

de si debe considerar expropiaciones o no, si tiene carril de sobrepaso o no, si tiene estaciones cerradas o no, si existen secciones soterradas o no, si tiene segregación física o no, si se ha construido a nuevo la vialidad o se utiliza la existente, etc. El mismo razonamiento puede realizarse respecto a LRT o Metro.

El costo promedio relevado para la implementación de sistemas BRT se sitúa en USD 17, millones por km, mientras que para el caso de LRT el promedio relevado asciende a USD 51 millones por km. El Metro, por su parte, registra los niveles de inversión más elevados, con promedios relevados que superan los USD 243 millones por km debido a la predominancia de infraestructura subterránea.

Es fundamental considerar que el CAPEX no solo incluye la obra civil y el material rodante, sino también sistemas de control, patios, talleres y servicios profesionales.

Gráfica 10. Dispersión de CAPEX por km de proyectos para las 3 alternativas tecnológicas, en Millones de USD/KM



Fuente: elaboración propia en base a diversas fuentes.

Nota: La muestra de proyecto contiene valores observados de CAPEX por km superiores a 350 millones USD definidos como límite de este gráfico ilustrativo.

Conclusiones y Recomendaciones Estratégicas

Las conclusiones preliminares subrayan que la definición de la alternativa modal para Montevideo no debe responder únicamente a la capacidad de transporte, ya que todos los modos evaluados cubren la demanda estimada. La decisión estratégica debe basarse en una evaluación conjunta de los requerimientos de infraestructura, la flexibilidad operativa y los costos de inversión frente al retorno social esperado. Se plantea que la integración de los corredores en el nodo de 3 cruces y el tramo de Av 18 de Julio concentran los factores críticos para la viabilidad de las distintas alternativas y que las alternativas soterradas representan una ventaja técnica que impacta en el desempeño del sistema.

Se recomienda avanzar en la planificación con una visión de red integrada, evitando soluciones fragmentadas. Finalmente, se destaca que la transformación del sistema de

transporte en el AMM requiere no solo de una solución técnica robusta, sino también de un fortalecimiento de la gobernanza metropolitana para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la inversión.