

## **MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE MONTEVIDEO (COSTOS, EMISIONES Y TIEMPOS)**

### **Nicolás Rezzano Tizze\***

Ingeniero Civil Hidráulico y Ambiental. Master en Ingeniería ambiental. Estudiante del doctorado en Ingeniería Ambiental de la UdelaR. Profesor adjunto del Departamento de Ingeniería Ambiental, IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR donde trabaja hace 10 años.



### **Mauro D'Angelo**

Departamento de Ingeniería Ambiental, IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

### **Elizabeth González**

Departamento de Ingeniería Ambiental, IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Dirección del autor principal (\*): Calle: Herrera y Reissig 565 – Punta Carretas –Montevideo – 11300 – Uruguay Tel.:+ 598 (2) 7113386 int 131 – Fax: +598 (2) 7115277. e-mail: [nrezzano@fing.edu.uy](mailto:nrezzano@fing.edu.uy)

### **RESUMEN**

El programa Unibici de la UdelaR y la iniciativa LTB (Liberá Tu Bicicleta) organizaron el primer Desafío Intermodal Montevideo, que fue llevado a cabo los días 5 y 6 de noviembre de 2014. El objetivo del Desafío Intermodal era reflexionar sobre los distintos modos de transporte urbano al que tienen acceso las personas en Montevideo, evidenciando algunas de sus características principales como su costo, eficiencia y connotaciones ambientales. La propuesta consistió en la realización de tres recorridos urbanos prefijados utilizando cuatro medios de transporte diferentes: ómnibus, auto, moto y bicicleta, midiendo la variable tiempo. En el presente trabajo se comparan los costos, las emisiones atmosféricas y los tiempos de viaje de los cuatro medios de transporte utilizados.

**Palabras Clave (en negritas):** Emisiones atmosféricas, movilidad urbana, transporte sustentable

### **INTRODUCCION**

El programa Unibici de la UdelaR y la iniciativa LTB (Liberá Tu Bicicleta) organizaron el primer Desafío Intermodal Montevideo (Unibici 2014), que se llevó a cabo los días 5 y 6 de noviembre de 2014. La propuesta consiste en la realización de tres recorridos urbanos prefijados utilizando cuatro medios de transporte diferentes: ómnibus, auto, moto y bicicleta. Los recorridos seleccionados, de una longitud aproximada de 7 km cada uno, son los siguientes: Entre Plaza Independencia y Avda. Rivera y Avda. Batlle y Ordoñez, Entre Plaza Independencia y Avda. 8 de Octubre y Larravide y Entre Plaza Independencia y Avda. Agraciada y Marcelino Díaz y García.

Estos recorridos se realizaron en dos días consecutivos, en horas del día con elevado flujo vehicular: el primer día, los recorridos fueron llevados a cabo en horario matutino y hacia el centro de la ciudad, mientras que en el segundo día, los recorridos fueron efectuados en horario vespertino y desde el centro de la ciudad. Cada recorrido fue efectuado por tres participantes de cada modo de transporte, respetando las reglas de tránsito. Esto totaliza 18 participantes por cada modo de transporte. Una vez efectuados los recorridos seleccionados, los cuatro medios de transporte utilizados fueron comparados entre sí en base a tres criterios: tiempo de viaje, costo y emisiones a la atmósfera.

## METODOLOGÍA

### Recorridos analizados

De los tres recorridos efectuados durante el Desafío Intermodal, en el presente artículo se analizarán dos de ellos, uno en horario matutino y otro en horario vespertino (Tabla 1).

**Tabla 1: Recorridos analizados**

Fecha	Hora de inicio	Lugar de inicio	Lugar de finalización
05/11/2014	09:15	8 de Octubre y Larravide	Plaza Independencia
06/11/2014	18:26	Plaza Independencia	Agraciada y Marcelino Díaz y García

### Emisiones

Las emisiones cuantificadas corresponden a contaminantes criterio y a gases de efecto invernadero (GEI). Para la estimación de las emisiones atmosféricas generadas por los medios de transporte durante la realización de los recorridos analizados se recurrió a los factores de emisión que se incluyen en el Primer Inventario de Emisiones a la Atmósfera realizado en el año 2009 (DINAMA - IMFIA, 2010) para el caso de contaminantes criterio y a factores de emisión publicados por el IPCC (IPCC, 2006) para el caso de GEI. Debido a la ausencia de combustión, no se emiten contaminantes criterio o GEI en el modo de transporte bicicleta. En la Tabla 2 se muestran los factores de emisión utilizados para el cálculo de emisiones de contaminantes criterio.

**Tabla 2: Factores de emisión utilizados para contaminantes criterio (DINAMA-IMFIA, 2010).**

Tipo de vehículo	FE PM (g/km)	FE SO <sub>2</sub> (g/km)	FE NO <sub>x</sub> (g/km)	FE CO (g/km)	FE COV <sub>s</sub> (g/km)
Ómnibus	0.73	0.73	16.72	5.36	1.40
Moto	-	0.001	0.07	9.96	1.65
Auto	-	0.045	2.04	16.00	2.48

Para la obtención de los factores de emisión que se muestran en la Tabla 2 fue necesario considerar rendimientos de combustible para cada tipo de vehículo. Los rendimientos utilizados fueron los incluidos en el Estudio del Consumo de Energía del Sector Transporte (DNE, 2008), los mismos se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3: Rendimientos utilizados.**

Tipo de vehículo	Rendimiento (km/L)
Ómnibus (urbano)	2.5 (Gasoil)
Moto	50 (Nafta)
Auto	10 (Nafta)

Con el objetivo de estimar los gramos emitidos a la atmósfera de cada contaminante por cada persona transportada fue necesario suponer, para cada medio de locomoción, la cantidad de pasajeros a bordo. Los valores supuestos se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4: Cantidad de pasajeros transportados.**

Tipo de vehículo	Cantidad de pasajeros transportados
Ómnibus	22
Moto	1
Auto	1.4
Bicicleta	1

Por otra parte en los recorridos analizados se registraron, cada treinta segundos, la concentración en el gas de escape de cinco gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , HC, CO y NO) y el parámetro lambda<sup>1</sup>. A su vez, cada recorrido fue grabado con un GPS de manera de contar con datos de velocidad y altitud del vehículo para cada registro de concentración. Por último, cada treinta segundos fueron determinadas manualmente (mediante la observación del tacómetro del vehículo) las revoluciones por minuto del motor. A partir de este registro se pudo estimar el caudal de gases de escape.

### **Costos**

En la determinación de costos, se consideran solamente los costos del usuario. Para el caso de moto y auto estos son: costos de combustible, costos de mantenimiento, costos de depreciación, costos de seguro y costos de patente. No se consideran los costos de estacionamiento. En el caso de la bicicleta sólo se toma en consideración el costo de depreciación y el costo de mantenimiento. En el caso del ómnibus sólo se considera el costo del boleto como costo directo del usuario.

Los costos de combustible por kilómetro recorrido se determinan a partir del costo del combustible (ANCAP, 2014) y del rendimiento (DNE, 2008) de éste para cada tipo de vehículo. Los costos de depreciación de los vehículos se determinan en función de un costo inicial y de su vida útil mediante el método de depreciación lineal. A los efectos de la determinación de los costos del seguro, se consideran costos del SOA. Los costos de patente y de mantenimiento se determinan en función de costos medios de vehículos representativos del parque automotor. A los efectos de la distribución de los costos de USD/km a USD/km/persona, se consideran las cantidades de pasajeros transportados que figuran en la Tabla 4.

### **Tiempos**

Los tiempos de viaje fueron determinados por los organizadores del evento a partir de tiempos de salida y llegada.

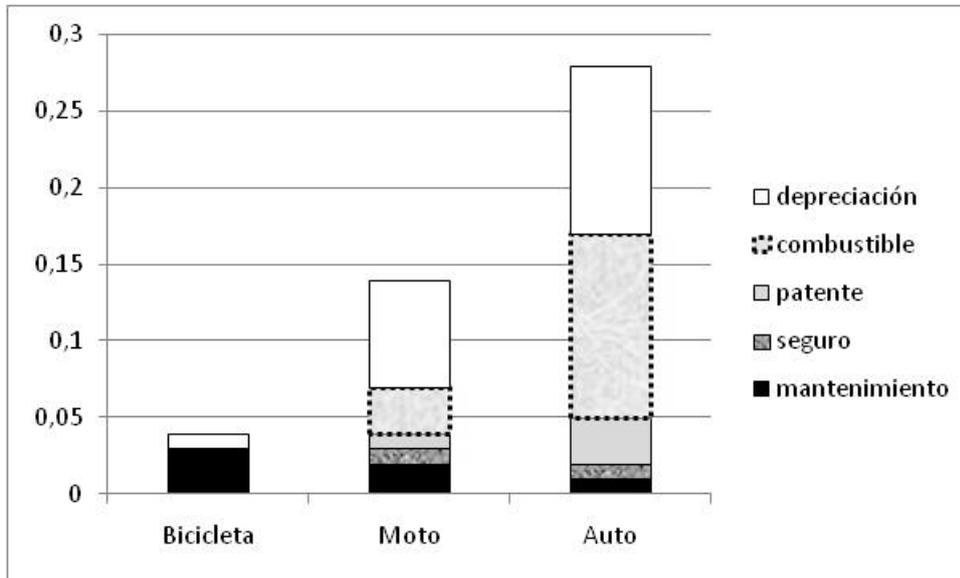
## **RESULTADOS**

### **Costos**

Los costos por vehículo son iguales a 0.04, 0.14 y 0.27 USD/km/persona para el modo bicicleta, moto y auto a nafta respectivamente. Vale mencionar que el costo del ómnibus por pasajero no depende del kilometraje y es de 0.92 USD/persona. En la Figura 1 se presentan los costos desglosados.

---

<sup>1</sup> El parámetro lambda representa el cociente entre la relación aire-combustible existente en el motor y la relación aire-combustible estequiométrica.

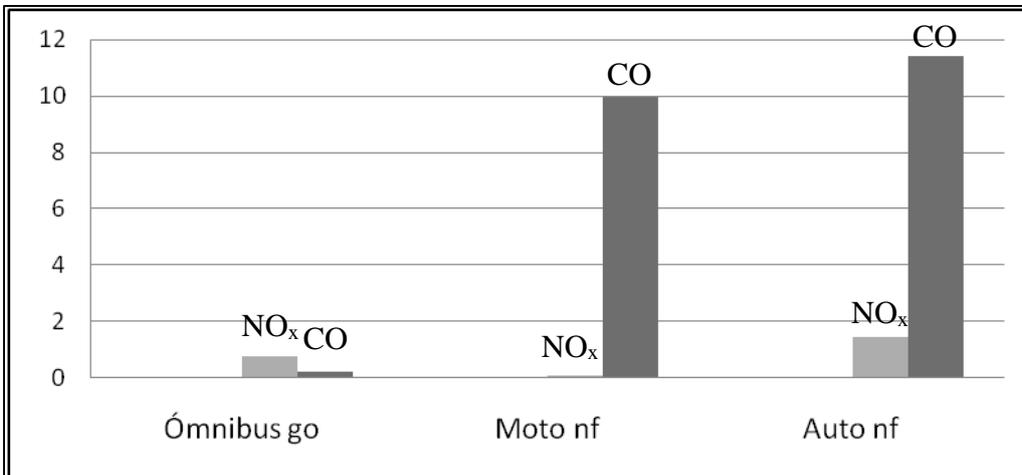


**Figura 1: Subtotales de costos del usuario por vehículo (USD/km/persona).**

**Emisiones**

En primer lugar se comentarán los resultados obtenidos mediante el empleo de factores de emisión. Las emisiones de CO<sub>2eq</sub> resultan ser 50, 47 y 169 g/km/persona para Ómnibus, Moto y Auto respectivamente. Es decir que las emisiones de CO<sub>2eq</sub> del transporte en moto o en ómnibus son similares y la de circulación en auto es 3 veces superior.

Por otra parte, en la Figura 2 se observan las emisiones de contaminantes criterio.



**Figura 2: Emisiones de contaminantes criterio (g/km/persona).**

En la Figura 2 se observa que el auto resulta ser también el modo de transporte más emisor de CO y NO<sub>x</sub> en términos de cantidades emitidas por kilómetro recorrido y por persona transportada. En dicha Figura también se destaca que las emisiones de SO<sub>2</sub> son despreciables para los tres modos de transporte relevados. Lo mismo puede decirse para las emisiones de PM en el caso de los autos y las motos. Las emisiones de PM para el ómnibus resultan ser 0.03 g/km/persona.

Como se dijo anteriormente, las emisiones atmosféricas también fueron evaluadas mediante mediciones realizadas en movimiento sobre dos autos participantes del Desafío Intermodal. En la Tabla 5 y en la Figura 3 se resumen las características de los vehículos relevados y de los recorridos evaluados.

**Tabla 5: Características de las mediciones de emisiones en movimiento realizadas.**

Fecha	Marca del vehículo	Modelo del vehículo	Antigüedad del vehículo (años)	Combustible utilizado	Recorrido realizado (km)	Duración del recorrido (min)
05/11/2014	Volkswagen	Gol	14	Nafta	8.6	40
06/11/2014	Peugeot	308	5	Nafta	6.5	23



**Figura 3: Recorridos realizados (NE-SO: 05/11/2014; SO-NO: 06/11/2014).**

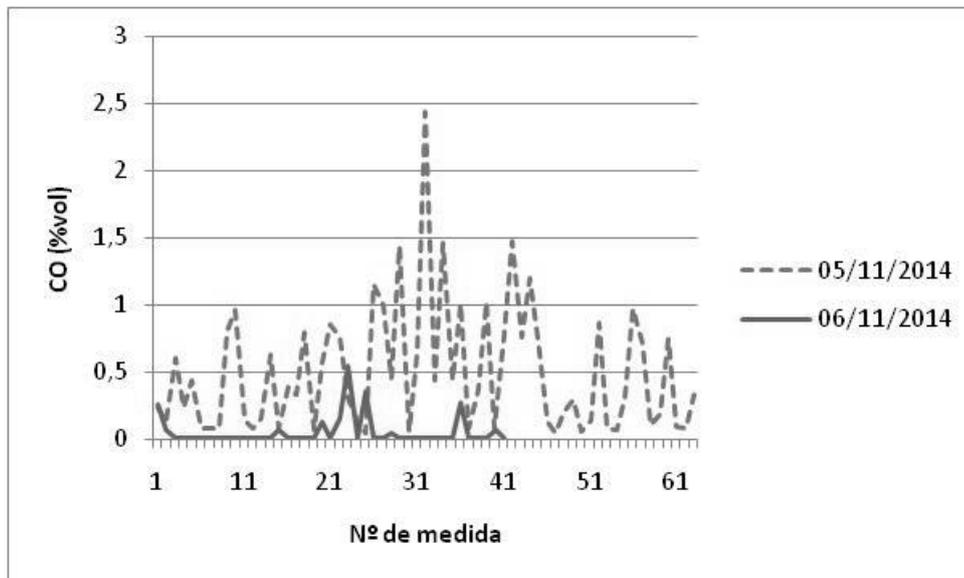
En la Tabla 6 se presentan los factores de emisión calculados a partir de las mediciones de emisiones en movimiento realizadas.

**Tabla 6: Factores de emisión calculados.**

Fecha	FE CO (g/km)	FE CO <sub>2</sub> (g/km)	FE HC (g/km)	FE NO (g/km)
05/11/2014	2.7	70.0	0.02	0.01
06/11/2014	0.2	74.4	0.001	0.004

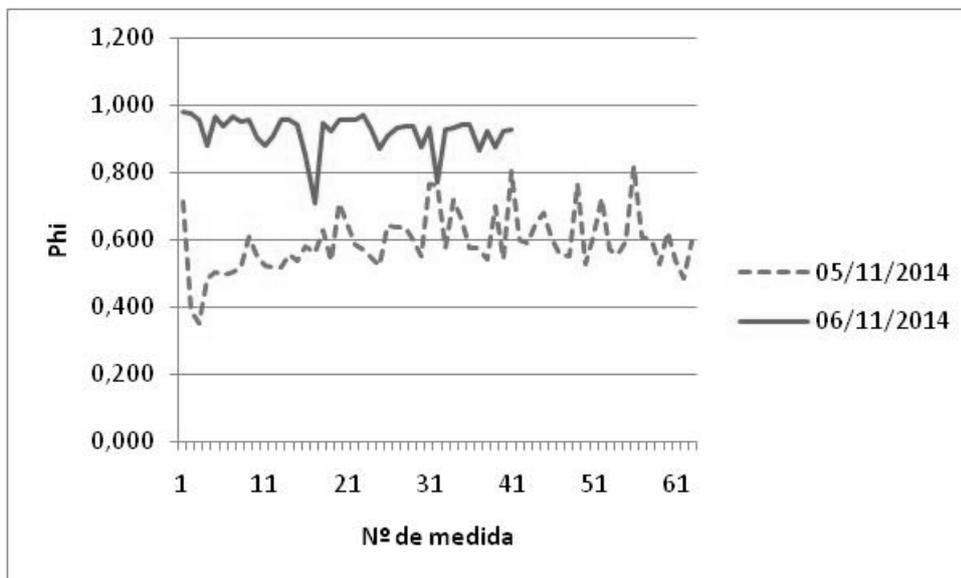
A partir de la observación de la Tabla 6, como era de esperar al realizar mediciones "on site" y considerar dos vehículos particulares, existen diferencias significativas entre los factores de emisión calculados para CO y NO y los utilizados para el cálculo de emisiones presentados en la Tabla 2. Se destaca que los factores de emisión calculados para CO, HC y NO se asemejan a valores bibliográficos consultados (Dilara *et al.*, 2013) (Fontaras *et al.*, 2014).

Otro resultado que se desprende de la observación de la Tabla 6 es la importante diferencia existente entre los factores de emisión calculados para los dos vehículos relevados. A modo de ejemplo, el factor de emisión de CO calculado para el vehículo más antiguo resulta ser muy superior al calculado para el vehículo más moderno. En la Figura 4 se muestran los registros de CO para los dos vehículos relevados.



**Figura 4: Emisiones de CO registradas.**

En la Figura 4 se observa claramente que el vehículo más antiguo presenta mayor cantidad de eventos de emisión de CO y de mayor magnitud que el vehículo más nuevo. Siendo el CO un producto de la combustión incompleta, se presume que el vehículo más moderno presenta una combustión más completa que el vehículo más antiguo y, como consecuencia de esto, produce menores emisiones de CO. La suposición anterior se confirma a partir de la observación de la Figura 5. En dicha figura se presenta la evolución del parámetro  $\phi$  a lo largo de cada recorrido analizado. Dicho parámetro es el cociente entre la relación combustible-aire actual y la estequiométrica (valores cercanos a uno indican combustiones esencialmente completas).



**Figura 5: Valores del parámetro  $\phi$  registrados.**

Tal cual se observa en la Figura 5, el vehículo más moderno presenta combustiones más completas que el más antiguo. Este hecho podría explicar las mayores emisiones de CO experimentadas por el vehículo más antiguo.

## Tiempos

Los tiempos de viaje fueron determinados por los organizadores del evento a partir de tiempos de salida y llegada. Los resultados se presentan en la Figura 6.



**Figura 6: Tiempos promedio por modo. (Fuente: Desafío Intermodal 2015)**

Es posible observar que la bicicleta y la moto demoran el mismo tiempo en realizar el recorrido, en auto se demora un 30% más que en los modos anteriores. En ómnibus el tiempo de viaje es levemente superior a la del auto y un 44% superior a la del la moto y bicicleta.

## CONCLUSIONES

Los costos por vehículo, expresados en USD/km/persona son iguales a 0.04, 0.14 y 0.27 para el modo bicicleta, moto y auto a nafta respectivamente. Vale mencionar que el costo del ómnibus por pasajero no depende del kilometraje y es de 0.92 USD/persona.

Las emisiones de CO<sub>2eq</sub> resultan ser 50, 47 y 169 g/km/persona para Ómnibus, Moto y Auto respectivamente. Es decir que las emisiones de CO<sub>2eq</sub> del transporte en moto o en ómnibus son similares y la de circulación en auto es 3 veces superior. Más allá que las mediciones realizadas no pretenden ser representativas del comportamiento de la flota vehicular nacional en cuanto a las emisiones atmosféricas generadas, cabe destacar nuevamente que las emisiones de CO y NO cuantificadas a partir de medición directa resultan significativamente menores a las estimadas mediante la utilización de factores de emisión. Se destaca también que las emisiones de CO<sub>2</sub> medidas resultan ser del orden de la mitad de las estimadas. La posibilidad de obtener apartamientos significativos viene siendo considerada por el equipo de trabajo desde la realización del Primer Inventario de Emisiones a la Atmósfera (DINAMA - IMFIA, 2010). Esto ha dado lugar a diversos trabajos de investigación, alguno cerrado (Rezzano, 2013) y otros en curso (D'Angelo, 2014).

Los tiempos de viaje fueron determinados por los organizadores del evento a partir de tiempos de salida y llegada. Es posible observar que la bicicleta y la moto demoran el mismo tiempo en realizar el recorrido (de 26 a 27 minutos), en auto se demora un 30% más que en los modos anteriores. En ómnibus el tiempo de viaje es levemente superior al del auto y un 44% superior al de la moto y bicicleta.

La bicicleta resulta ser el vehículo más sostenible (menores costos, emisiones y tiempos de viaje) por excelencia. En el párrafo anterior se demuestra que el tiempo de viaje no es superior al de los otros modos de transporte analizados. Dicho esto, la utilización de este modo de transporte está condicionada a la existencia de infraestructura segura y en buenas condiciones. Se destaca que, a nivel internacional, la promoción del uso de la bicicleta como medio de transporte es una prioridad para la salud pública. Más allá de lo anterior, son necesarias medidas a distintos niveles para incentivar su uso de forma segura.

**Agradecimientos.** – Se agradece a los integrantes de Unibici de la UdelaR y la iniciativa LTB (Liberá Tu Bicicleta). También se agradece la colaboración de Elías Rubinstein para el cálculo de los costos asociados a cada modo de transporte analizado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- ANCAP (2014). Histórico de precios de combustible. Recuperado de <http://www.ancap.com.uy/Precios%20Historicos/Listado%20de%20precios%20combustibles.pdf>
- 2- D'Angelo, Mauro (2014). Caracterización de las emisiones atmosféricas del transporte en Montevideo. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental - UdelaR, En elaboración.
- 3- Dilara, Panagiota *et al.* (2013). Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors. *Atmospheric Environment* 64 329-338.
- 4- DNE-MIEM (2008). Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional. Recuperado de [http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/planificacion-y-balance/-/asset\\_publisher/mf9rbTf1ofs2/content/estudio-de-consumos-y-usos-de-la-energia-2006](http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/planificacion-y-balance/-/asset_publisher/mf9rbTf1ofs2/content/estudio-de-consumos-y-usos-de-la-energia-2006)
- 5- DINAMA-MVOTMA - FING-UdelaR (2010). Informe final del primer inventario de emisiones atmosféricas.
- 6- Fontaras, Georgios *et al.* (2014). Development and review of Euro 5 passenger car emission factors base don experimental results over various driving cycles. *Science of the Total Environment* 468-469 1034-1042.
- 7- IPCC (2006). Volumen 2, Energía. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol2.pdf>
- 8- Rezzano, Nicolás (2013). Inventario de emisiones a la atmósfera debidas al consumo de energía en Uruguay. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental – UdelaR.
- 9- UNIBICI (2014). Desafío Intermodal Montevideo/ 2014. Recuperado de [http://www.unibici.edu.uy/IMG/pdf/desafio\\_intermodal\\_mdeo\\_2014.pdf](http://www.unibici.edu.uy/IMG/pdf/desafio_intermodal_mdeo_2014.pdf)