

## ESTIMACIÓN CONSUMO DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE REGISTROS GPS

Patricio Alvarez-Mendoza Ph.D., Universidad del Bío Bío [palvarez@ubiobio.cl](mailto:palvarez@ubiobio.cl)

Leandro Gayozo, Universidad del Bío Bío [lgayozo@alumnos.ubiobio.cl](mailto:lgayozo@alumnos.ubiobio.cl)

Dr. Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción, [techaveg@udec.cl](mailto:techaveg@udec.cl)

*Palabras claves:* Consumo de combustible, GPS, ITS

### RESUMEN

El sector transporte en Chile es uno de los más importantes en cuanto a consumo de energía se refiere, en particular el subsector transporte terrestre (vehículos livianos, taxis, furgones, camionetas, buses y camiones) que crece anualmente a tasas importantes. Esto implica un aumento en el uso de los combustibles, y asimismo de las emisiones asociadas. Dado este fenómeno, resulta interesante estimar el consumo de combustible y las emisiones derivadas de la operación del sistemas de transporte a nivel micro, esto con el fin de gestionar, planificar y modelar diversos escenarios incluyendo de manera directa los costos asociados a los consumos y los impactos a la calidad del aire debido a las emisiones. Para estimar dichos indicadores se adaptó para el caso del transporte público en Chile un modelo de consumo instantáneo desarrollado en Virginia-Tech y se desarrolló una herramienta computacional que permite estimar los consumos de combustible a partir de registros GSP de la velocidad y la aceleración instantánea de un vehículo. En una última etapa se aplica el modelo con fines demostrativos para estimar el consumo agregado en el tiempo de una flota de transporte público del Gran Concepción (buses).

## 1. INTRODUCCIÓN

Los operadores de transporte público en las rutas licitadas del Gran Concepción están utilizando dispositivos de posicionamiento global (GPS) y cámaras de video para controlar de manera más eficiente la operación y recaudación de su flota. Dichos datos son almacenados en bases de datos administradas por empresas informáticas locales y actualmente están a disposición del presente proyecto producto de convenios entre los operadores de transporte y la Universidad de Concepción.

La movilidad se considera un factor importante en la economía y el desarrollo humano. En Chile, particularmente en el Gran Concepción, de acuerdo a los indicadores de movilidad puestos a disposición por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA), se generan cerca de 3 millones de viajes por día (SECTRA, 1999), los cuales se reparten en los distintos modos de transporte disponibles, estos son vehículos particulares, taxis, buses, camiones, entre otros.

El crecimiento del parque vehicular es otro indicador importante que ha tenido alzas significativas, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas, (INE 2014), dicho indicador se ha triplicado en los últimos 20 años en Concepción. Esto implica grandes beneficios para el desarrollo y la economía de la Región, pero también genera grandes costos asociados a la operación, principalmente demoras, costos de consumo de combustible, impactos en el medio ambiente, entre otros.

En términos de consumo de energía el sector transporte es el responsable del 32% del consumo nacional (Ministerio de Energía, 2011). De este porcentaje el 79% corresponde al subsector del transporte terrestre que incluye a todos los modos rodoviarios. Cabe destacar que el 99.3% de la energía que utiliza este sector corresponde a derivados del petróleo.

Con respecto a las proyecciones del sector, se espera un incremento promedio anual de un 7.3% del consumo total de energía (combustible principalmente) del sector transporte entre los años 2006 y 2030 (Comisión Nacional de Energía, 2009).

Por lo tanto, debido a la importancia del sector transporte terrestre y a las tasas de crecimiento que se esperan, es necesario contar con información que sirva para la toma de decisiones en términos de eficiencia energética, en particular la relacionada al consumo eficiente del combustible y a las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Una de las estrategias claves para mejorar la eficiencia en el uso del combustible, es potenciar el transporte público. En la actualidad, la Provincia de Concepción cuenta con más de 5000 buses de transporte urbano y con más de 1800 taxi-colectivos, por lo que resultaría interesante conocer el consumo de combustible y emisiones a nivel operacional de dichas flotas, para evaluar de manera más precisa los impactos que se generan a partir de ellos.

En función de todos estos antecedentes, el presente estudio busca entregar una herramienta para la estimación del consumo de combustible y emisión de contaminantes instantáneos, en específico el CO<sub>2</sub>, a través de la programación de un modelo matemático cuyas variables explicativas correspondan a la velocidad y aceleración instantánea. Las estimaciones desprendidas de la aplicación de la herramienta buscan poner a disposición información relevante para la evaluación de proyectos a nivel operacional.

El modelo estudiado y utilizado corresponde al Virginia-Tech Comprehensive Power Based Fuel Consumption Model (VT-CPFM, por sus siglas en inglés), desarrollado por Hesham Rakha y publicado originalmente en (Rakha et al., 2011) y extendido en (Rakha et al., 2014).

Una de las principales ventajas del modelo usado, corresponde a la facilidad para su calibración debido a que usa información pública de fácil acceso para ello.

Por otra parte se busca entender el modelo con el fin proponer mejoras para casos donde no se cuente con información para su calibración.

Finalmente se aplica la herramienta basada en el modelo propuesto para estimar consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> de un extracto del recorrido del transporte público del Gran Concepción (buses)

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes Generales

El consumo de combustible de un vehículo depende de muchos factores, estos se pueden clasificar en seis grandes categorías (Ahn et al., 2002), que tienen relación principalmente con: el viaje, el clima, el vehículo, la calzada, el tráfico y el conductor. El principal factor debido al viaje es la distancia recorrida. En el caso del clima, se consideran factores como la temperatura, la humedad y los efectos del viento. En tanto para los factores relacionados con el vehículo, destacan las características físicas y mecánicas, en particular las del motor. Por otra parte, respecto a la calzada, los principales factores son la pendiente longitudinal y la rugosidad. En relación al tráfico, los factores más importantes son la interacción vehículo – vehículo y la interacción entre el vehículo y el sistema de control de la ruta (señales, semáforos, entre otros). Finalmente, respecto al conductor los factores relevantes corresponden a la agresividad y al comportamiento al conducir.

Los modelos que actualmente se hacen cargo del problema emplean con mayor o menor profundidad los factores antes descritos, generándose una relación en muchos casos inversamente proporcional entre la simplicidad de un modelo con la precisión del mismo.

Los modelos se pueden clasificar en macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos (Ribeiro et al., 2012) donde, como el nombre sugiere, la clasificación propuesta refiere a la escala de aplicación.

Los modelos macroscópicos están relacionados a menudo con grandes escalas de emisiones o consumos de combustible, como en una ciudad por ejemplo. Estos modelos no consideran condiciones de operación individual, si no que se basan en velocidades promedio de flujos promedio. En general estos modelos tienen a simplificar los cálculos relacionados al consumo de combustible y emisiones de contaminantes, lo cual reduce la precisión. Sin embargo son muy útiles para tareas como evaluación o planificación a gran escala.

Los modelos mesoscópicos se asocian a escalas medias de operación, usan velocidades promedio del flujo o incluso en algunos casos velocidades y aceleraciones instantáneas. Estos modelos están orientados a caracterizar la relación entre el flujo y las características de la ruta. Uno de los módulos más reconocidos a nivel mesoscópico corresponde al integrado en SATURN (Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks, por sus siglas en inglés).

Los modelos microscópicos son los más precisos entre las tres categorías, se basan en variables instantáneas como la velocidad y aceleración, además de las características particulares de los vehículos modelados. Sin embargo el esfuerzo de calibración y el costo computacional asociado a la

simulación de flujos es alto. En particular, existen varios tipos de modelos microscópicos, estos se diferencian por los niveles de precisión y particularmente por la forma en que se construyen. Una clasificación respecto a esto último se presenta en (Cappiello et al., 2002), los subtipos característicos son:

Mapas de emisiones: Son matrices que contienen las emisiones promedios para una serie de combinaciones de velocidad y aceleración. Aunque son fáciles de generar y usar, no son sensibles a las condiciones del tráfico o a los parámetros de la calzada entre otros.

Modelos basados en regresiones estadísticas: típicamente predicen el consumo de combustible y las emisiones usando métodos de regresión. Para la construcción de estos modelos es necesario contar con una base de datos que contengan mediciones empíricas de velocidad, aceleración, consumo y emisiones.

Modelos basados en carga: son modelos que se basan en la relación que existe entre consumo de combustible y la potencia emitida por el motor. Estos modelos tratan de simular los fenómenos físicos que generan potencia, y esta a su vez consumo. Por lo general son más detallados y flexibles. Esto también significa que estos modelos pueden ser más complejos y en consecuencia, consumir una gran cantidad de potencia computacional en el cálculo

Con el fin de atender los objetivos del presente estudio, se evaluó la aplicación de distintos modelos microscópicos de consumo de combustible al caso regional, principalmente los basados en regresiones estadísticas y los modelos basados en carga.

## 2.2. Modelos microscópicos para la estimación del consumo de combustible

Dados los objetivos del presente proyecto, resulta adecuada la implementación de un modelo microscópico. Las siguientes líneas dan cuenta de la bibliografía consultada respecto a los modelos que permiten estimar los consumos de combustible, por otra parte se presenta un análisis respecto a la aplicabilidad de dichos modelos dado los recursos disponibles para este proyecto.

### 2.2.1. Estimación del consumo de combustible y emisiones basados en los niveles de velocidad y aceleración instantánea

Uno de los modelos consultados corresponde a la propuesta desarrollada por (Ahn et al., 2002). Este es un modelo microscópico construido experimentalmente usando la base de datos del Oak Ridge National Laboratory (ORNL, por sus siglas en inglés) que contiene las mediciones de combustible y emisiones obtenidas de las pruebas realizadas en laboratorio sobre un dinamómetro de chasis, con el cual además se registraron los niveles de velocidad y aceleración instantáneas. Con este conjunto de datos se generaron relaciones entre los niveles de combustible consumidos y emisiones de contaminantes con los niveles de velocidad y aceleración instantánea del vehículo.

Para generar una función que relacionara las mediciones cinemáticas instantáneas con los consumos y emisiones, se experimentó con numerosas combinaciones polinómicas de las variables cinemáticas.

El modelo final construido corresponde a un polinomio de tercer grado. El modelo propuesto se ajusta razonablemente con los datos de la ORNL excepto en algunos casos donde se producen dependencias negativas. Para resolver este problema, se aplicó al modelo una técnica de

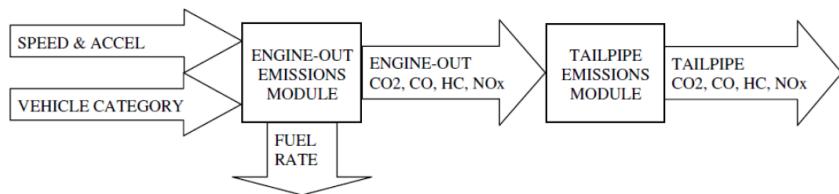
transformación usando el logaritmo natural, obteniéndose coeficientes de determinación del modelo entre 0.72 a 0.99 dependiendo de la estimación realizada. En el caso del consumo de combustible su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) corresponde a 0.996, en el caso de las emisiones de NOx, su  $R^2$  fue de 0.805 y finalmente para las emisiones de HC y CO se estimaron  $R^2$  de 0.72 y 0.75 respectivamente.

Debido a que el modelo presentado se desarrolla a partir de regresiones sobre una base de datos, su aplicación se limita a dicho universo, por lo que es necesaria la calibración si el contexto de la base de datos cambia.

### 2.2.2. Emissions from Traffic (EMIT)

EMIT (Emissions from Traffic, de sus siglas en inglés) es un modelo estadístico (con base en un sistema físico) para emisiones instantáneas y consumo de combustible de vehículos livianos. Las variables explicativas en EMIT se han derivado a partir de enfoques basados en carga con algunas simplificaciones. El modelo, debido a su estructura simple, es relativamente fácil de calibrar y se espera que requiera un costo computacional menor en comparación a modelos basados en carga.

Un diagrama de la estructura del modelo se presenta a continuación:



**Figura 1: Estructura de EMIT**

Este modelo depende de un registro segundo a segundo de velocidad y aceleración además de la categoría del vehículo para estimar los consumos de combustible segundo a segundo. Por otra parte, el modelo permite estimar los índices de emisiones una vez calculado el consumo de combustible.

Este modelo ha sido referenciado en diversos artículos debido a la precisión de los resultados, en particular al módulo que estima el consumo de combustible. Por otra parte, EMIT presenta buenos resultados para emisiones de CO<sub>2</sub>, razonables para CO y NOx, y baja precisión para los hidrocarburos (HC) (Cappiello et al., 2002).

### 2.2.3. Virginia Tech Comprehensive Power Based Fuel Consumption Model (VT-CPFM)

Virginia Tech – Comprehensive Power Based Fuel Consumption Model (VT-CPFM, de sus siglas en inglés) es un modelo basado en la potencia instantánea que permite estimar consumo de combustible instantáneo en función de variables explicativas como la velocidad y la aceleración. Una de las ventajas del modelo es que no requiere para su calibración parámetros específicos de laboratorio o de operación en terreno, toda la información que se usa para calibrar es de acceso público, además no oscila abruptamente en estados de estimación de consumo de combustible como la mayoría de los modelos basados en carga, esto debido a que el modelo tiene una estructura

polinomial de segundo orden respecto a la potencia específica del vehículo, lo que implica que la derivada parcial respecto al torque, es una función del torque.

El modelo original se aplica a vehículos livianos, sin embargo se extiende la aplicación de éste para buses en (Rakha et al., 2014).

La estructura del modelo se presenta a continuación:

$$FC(t) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 P(t) + \alpha_2 P(t)^2 & \forall P(t) \geq 0 \\ \alpha_0 & \forall P(t) < 0 \end{cases} \quad Ec. (1)$$

Donde  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , son parámetros que se calibran en específico para cada vehículo a simular,  $P(t)$  corresponde a la potencia requerida por el motor (kW), su modelo se expresa como sigue:

$$P(t) = \left( \frac{R(t) + (1 + \gamma)ma(t)}{3600\eta_d} \right) v(t) \quad Ec. (2)$$

Donde:

$\gamma$ : Factor rotacional de masa, 0.04 para vehículos livianos y 0.1 para vehículos pesados

$m$ : Masa del vehículo (kg)

$\eta_d$ : Eficiencia de transmisión mecánica

$a(t)$ : Aceleración instantánea (m/s<sup>2</sup>)

$v(t)$ : Velocidad instantánea (m/s)

$R(t)$ : Fuerzas resistentes (N)

La expresión general de las fuerzas resistentes se presenta a continuación:

$$R(t) = R_a + R_{rl} + R_g \quad Ec. (3)$$

Donde:

$R_a$ : Resistencia aerodinámica

$R_{rl}$ : Resistencia a la rodadura

$R_g$ : Resistencia debido a la inercia

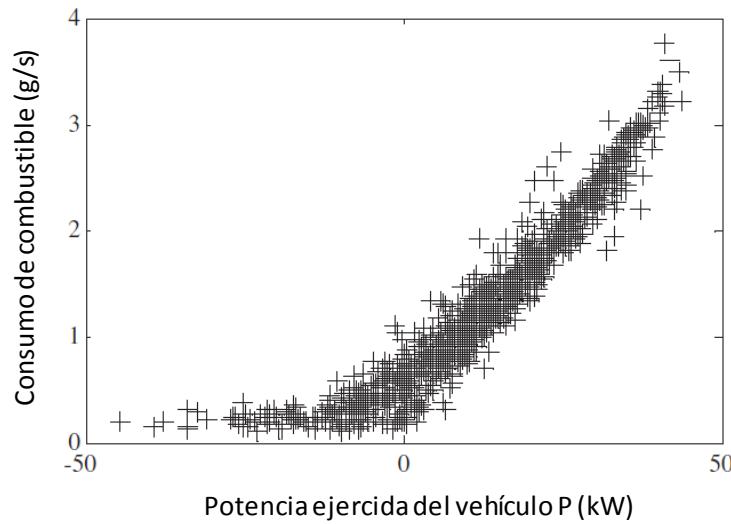
Las principales ventajas de este modelo radican en superar dos deficiencias que la mayoría de los modelos basados en carga poseen. Específicamente el modelo no oscila abruptamente entre dos estados de consumo. Este tipo de fenómeno se produce debido a que la derivada parcial del nivel de consumo de combustible ( $F$ ) con respecto al torque ( $T$ ) del motor no es función del torque (Saerens et al., 2010) o  $\partial F / \partial T \neq \int T dT$  (generalmente en modelos lineales). Un modelo que

produce este tipo de fenómeno indica que el nivel óptimo de eficiencia en el consumo de combustible se produce al realizar lo más rápido posible los cambios para reducir el tiempo de aceleración. Esta situación, la cual es obviamente incorrecta, recomienda que el conductor conduzca lo más agresivo posible para minimizar su consumo de combustible (Rakha, H., et al 2011).

La segunda limitante que supera es con respecto a la calibración, debido principalmente a que utiliza parámetros y datos de uso público para llevarla a cabo. Entre las fuentes más importantes se encuentran las bases de datos publicadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y el Centro de Investigación y Pruebas de Buses de Altoona (ABRTC, por sus siglas en inglés). Ambas instituciones Norteamericanas, realizan pruebas de rendimiento y emisiones a distintos tipos de vehículos, por otra parte la información mecánica de los vehículos es puesta a disposición por los distintos fabricantes.

El modelo basado en carga propuesto tiene una estructura polinomial de segundo orden, esto es para asegurar la forma convexa que existe entre la relación del consumo instantáneo de combustible y la potencia ejercida del vehículo. Además para asegurar que la derivada del consumo ( $F$ ) respecto al torque ( $T$ ) sea función del torque.

Una gráfica característica de la relación entre consumo y poder ejercido se muestra en la siguiente figura.



**Figura 2: Relación entre Consumo Instantáneo y Potencia**

Cabe destacar que la velocidad y aceleración instantáneas se pueden obtener mediante un sistema de diagnóstico a bordo (On Board Diagnostics) o simplemente de un sistema de posicionamiento global (GPS).

### 2.3. Validación VT-CPFM

Dado que VT-CPFM ha sido desarrollado para representar la realidad del parque en los Estados Unidos, cabe preguntarse si es necesario calibrar y validar su uso antes de su implementación. Para ello se estudió la capacidad del modelo en reproducir consumos reales,

estudiando datos de consumo reales capturados en la ciudad de Concepción, los cuales fueron comparados con consumos modelados.

En particular, se realizaron pruebas con un vehículo SUV (Sport Utility Vehicle), marca KIA, modelo Carens del año 2008, el cual contaba con un puerto compatible con el protocolo OBD-II. A continuación se detallan algunas características mecánicas importantes para la implementación del modelo VT-CPFM:

**Tabla 1 Parámetros mecánicos del vehículo**

Marca	KIA
Modelo	Carens LX
Masa [kg]	1582
Eficiencia de la transmisión %	0.9
Tipo de combustible	Diésel
Cilindrada [lts]	2
Numero de cilindros	4
Área frontal [m <sup>2</sup> ]	2.97
Coeficiente de arrastre	0.32

Además del vehículo utilizado se ha contado con un dispositivo OBD el cual se encarga de leer la información proporcionada por los sensores del automóvil. Además cabe mencionar que el software utilizado para la lectura de datos fue ScanXL

Para realizar las pruebas se escogió un trazado eminentemente urbano en un período comprendido entre las 17:30-19:00 hrs., lo cual permite capturar datos en condiciones de congestión y flujo libre. Para ejecutar las pruebas de recolección de datos se utilizó una técnica híbrida combinando average car y floating car. Los resultados indican que la diferencia máxima entre los consumos reportados por el modelo y lo efectivamente medidos con el dispositivo OBD no superan el 3%

#### 2.4. Estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>

Para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> el modelo original, utiliza una regresión lineal en base a mediciones empíricas donde calibra un parámetro de proporción respecto al consumo de combustible, mayores detalles se pueden encontrar en (Rakha et al., 2011).

Para efectos de este estudio, se utilizaron las relaciones propuestas por la EPA en su publicación (EPA, 2005). 30

De acuerdo a los valores provistos por el Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos (40 CFR 600.113), el contenido de carbono en gasolina y diésel por galón (medida inglesa) corresponde a:

Carbono en un galón de gasolina: 2.421 gramos

Carbono en un galón de diésel: 2.778 gramos

Nota: 1 galón = 3,7854 litros

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub>, un grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, en sus siglas en inglés) sugiere aplicar un factor de oxidación al contenido de carbono, esto para dar cuenta de la pequeña parte del combustible que no se oxida en CO<sub>2</sub>. Para todos los productos derivados del petróleo el factor de oxidación usado es 0.99 (esto quiere decir que el 1% del carbono no se oxida en CO<sub>2</sub>)

Finalmente para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> por galón de combustible, el carbono contenido es multiplicado por la relación entre el peso molecular del CO<sub>2</sub> (44 g/mol) y el peso molecular del carbono (12 g/mol): 44/12

CO<sub>2</sub> emitidos de 1 galón de gasolina = 2.421 gramos x 0,99 x (44/12) = 8.788 gramos = 8,8 kg/galón = 2.325 gramos/litro

CO<sub>2</sub> emitidos de 1 galón de diésel = 2.788 gramos x 0,99 x (44/12) = 10.084 gramos = 10,1 kg/galón = 2.668 gramos/litro

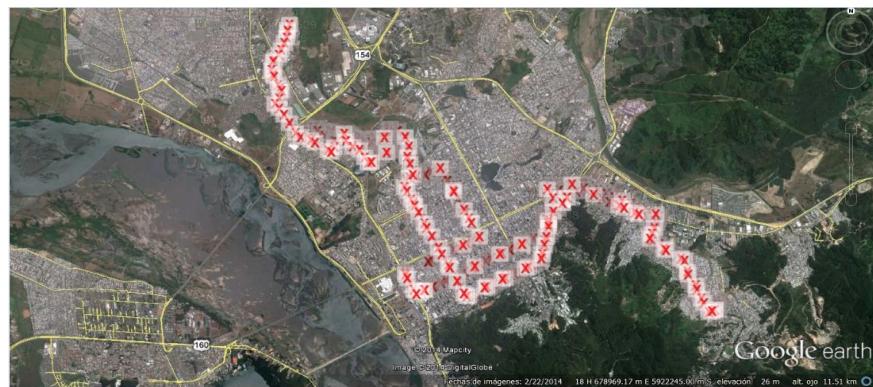
Por lo tanto los valores usados para la estimación de CO<sub>2</sub> en el modelo, se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 3 Factores de emisión de CO<sub>2</sub> según tipo de combustible**

Emisiones de CO <sub>2</sub> para gasolina	2325 g/l
Emisiones de CO <sub>2</sub> para diésel	2668 g/l

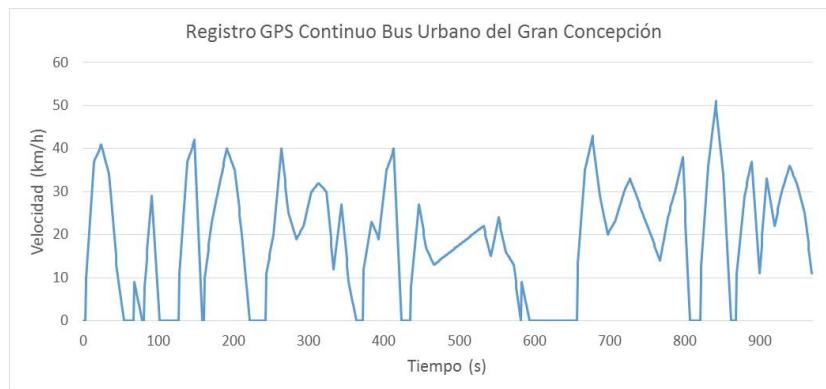
### **3. APLICACIÓN AL TRANSPORTE PÚBLICO DE CONCEPCIÓN**

El modelo se implementa y aplica sobre la base de datos correspondiente a los registros GPS del Sistema de Transporte Público del Gran Concepción. Éstos se enmarcan dentro del contrato de licitación del servicio que actualmente opera. En particular para demostrar la metodología, se estudiará el registro GPS del recorrido de un bus urbano de la línea Nueva Sol Yet S.A. cuyo servicio es el N° 143. Una vista del recorrido, además de la forma en que se encuentran los datos se presenta a continuación.

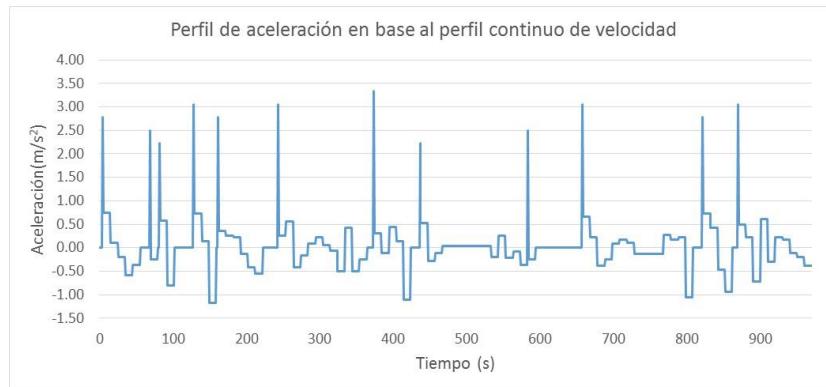


**Figura 2 Recorrido Nueva Sol Yet S.A**

Los registros se presentan como datos discretos. Los archivos Keyhole Markup Language (kml, para Google Earth) asociados sólo indican la hora, posición (Latitud y Longitud) y la velocidad registrada en Km/h. Las siguientes figuras muestran un extracto de la estructura de datos de un recorrido.



**Figura 3 Registro continuo de velocidad del recorrido en estudio**



**Figura 4 Perfil de aceleración en el recorrido de estudio**



**Figura 5 Perfil de Pendientes en el recorrido de estudio**

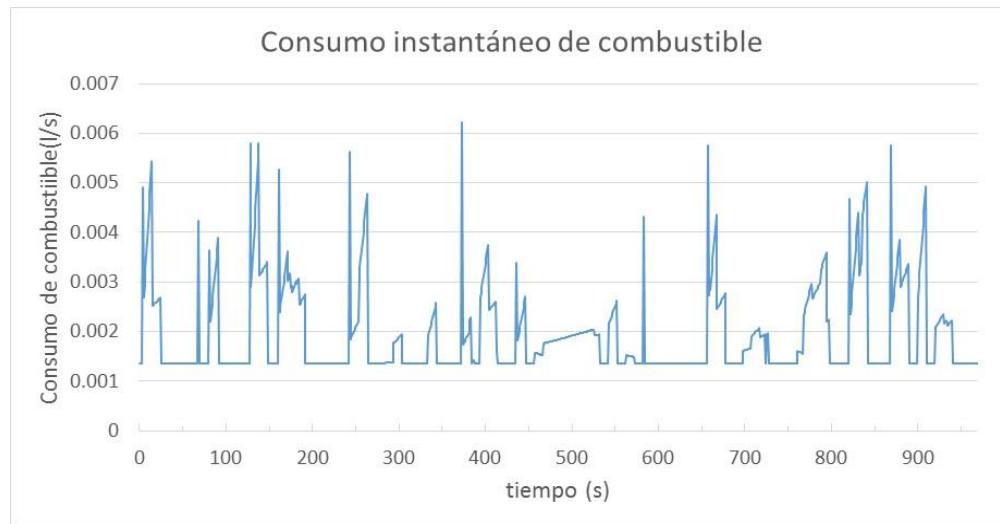
Uno de los supuestos que se harán en este estudio es la homologación del vehículo a calibrar, debido a que no hay datos de los rendimientos en combustible y emisiones de los buses del transporte público del Gran Concepción sobre los ciclos estándar presentados.

Así la aplicación del modelo permite estimar la velocidad óptima la cual se estimó en 56.43 km/tal como se representa a continuación:



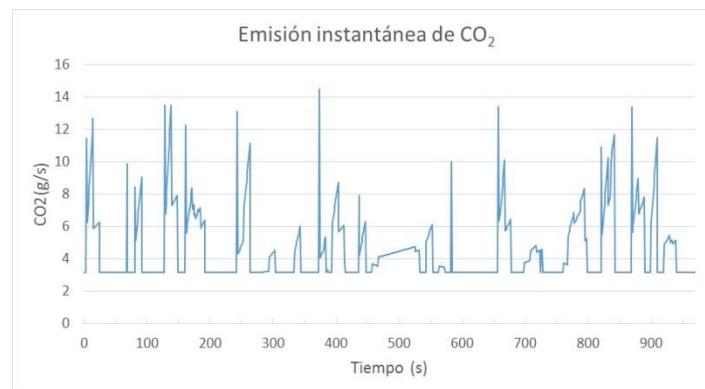
**Figura 6 Gráfica de velocidad óptima de operación**

El consumo total de combustible para el tramo analizado se estimó en 1.89 litros, una gráfica del consumo instantáneo se presenta a continuación.



**Figura 7 Consumo instantáneo de combustible**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> para el recorrido analizado se estimaron en 4342.19 gramos, el gráfico que representa esta situación se presenta a continuación.



**Figura 8 Gráfica de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>**

Como resumen, se presenta a continuación una tabla con los datos relevantes de la evaluación.

#### Resumen de resultados recorrido Gran Concepción

Tiempo analizado	970 s
Distancia recorrida	5.13 km
Velocidad máxima del recorrido	51 km/h
Velocidad promedio del recorrido	19.05 km/h
Aceleración máxima del recorrido	3.33 m/s <sup>2</sup>
Velocidad óptima de operación	56.43 km/h
Consumo de combustible	1.86 L
Emisiones de CO <sub>2</sub>	4342.19 g

Una comparación entre el ciclo que se usó para la calibración en ambiente urbano (Manhattan) y el recorrido analizado del Gran Concepción, se presenta el siguiente cuadro comparativo.

Tabla 1: Comparación entre ciclo Manhattan y Gran Concepción

	Manhattan bus Drive cicle	Recorrido Gran Concepción
tiempo	1089 s	971 s
Distancia recorrida	3.32 km	5.13 km
Velocidad promedio	10.99 km/h	19.05 km/h
Emisión de CO <sub>2</sub>	3567.8 g	4342.19 g
Consumo de combustible	1.7 L	1.86 L

Considerando que los datos registrados por el ciclo Manhattan fueron obtenidos mediante un dinamómetro de Chasis, y aunque la comparación aquí realizada no tiene una validez estadística, se puede observar la consistencia de los resultados en términos de sus rangos.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general se han identificado las variables que explican el consumo de combustible, estas se han relacionado con variables explicativas instantáneas como la velocidad y la aceleración. Para este caso en particular, se ha usado un modelo microscópico basado en carga que permite estimar el consumo de combustible mediante la estimación de la potencia del motor, y esta a su vez mediante la estimación de las fuerzas resistivas, las cuales se derivan de un análisis de la dinámica del movimiento de un vehículo.

Con respecto al modelo usado, este presenta grandes ventajas en relación al esfuerzo de calibración y a la precisión de los resultados para vehículos livianos, esto debido principalmente a que utiliza información pública puesta a disposición por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, en sus siglas en inglés) que certifica rendimientos y emisiones bajo pruebas estándar para una gran cantidad de vehículos comerciales.

Para el caso de los vehículos pesados, particularmente buses, existe información pública aunque más limitada y no de carácter oficial, puesta a disposición por el Centro de Investigación y Pruebas de Buses de Altoona (Altoona Bus Research and Testing Center, su nombre original en inglés), aun así el modelo fue capaz de replicar de manera precisa los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el centro de investigación, aunque como se mencionó en el análisis de sensibilidad, estos resultados deben tratarse con cautela pues el modelo original se diseñó para vehículos livianos, su aplicación en buses corresponde a una extensión del modelo original con algunas modificaciones.

Por otra parte se señala el potencial de adaptación del modelo para su calibración cuando no se tenga información pública, en específico, la estructura del modelo permite identificar claramente que parámetros explican el consumo de combustible. Un ejemplo de ello es el consumo en ralentí, que es representado por  $\alpha_0$  el cual puede medirse directamente utilizando un

On Board Diagnostics (OBD), el resto de los parámetros de calibración pueden obtenerse mediante la aplicación de ciclos cortos, utilizando el mismo instrumento (OBD).

En relación a la sistematización del modelo, se puede señalar que es de baja dificultad y con mucho potencial en aplicación. Entre los potenciales destacan:

La calibración resulta simple, siempre y cuando existan datos de pruebas oficiales respecto al consumo y emisiones evaluadas en ciclos estándar, de no ser así es necesario homologar las características del vehículo (lo que se hizo en esta memoria), usar un ODB o si es posible un dinamómetro de chasis

Dentro de las variables instantáneas explicativas se debe contar con el perfil de pendientes, el cual resulta insuficiente si se registra con una unidad de posicionamiento global (GPS) convencional, lo que se recomienda es medir la pendiente mediante algún dispositivo mecánico-electrónico.

Ahn K., Rakha H., Trani A., Van Aerde M., (2002) Estimating Vehícle Fuel Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels

Barlow J., Latham S., McCrae S., Boulter G., (2009) A reference Book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions

Bio Octavas Buses <http://www.biooctavabuses.cl/> [Acceso 12 de Diciembre 2014]

Cappiello A., Chabini I., Nam E., Luè A., Zeid M., (2002) A Statistical Model of Vehicle Emissions and Fuel Consumption.

Comisión Nacional de Energía (2009), Modelo de Proyección, Demanda Energética Nacional de largo plazo.

Edwardes W. and Rakha H. (2014), "Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model: Modeling Diesel and Hybrid Buses," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.

EPA (2005), Average Carbon Dioxide Emissions Resulting From Gasoline and Diesel Fuel.

Guzzella L., Sciarretta A. (2007) Vehicle Propulsion Systems, Second Edition, USA.

Instituto Nacional de Estadísticas (2014) Anuarios parque de vehículos en circulación [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/estadisticas\\_economicas/transporte\\_y\\_comunicaciones/pa\\_rquevehiculos.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/transporte_y_comunicaciones/pa_rquevehiculos.php), [Acceso el 01 Diciembre 2014.]

J2711 (2010), Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-Duty Vehicles.

Ministerio de Energía (2011), Plan de acción de eficiencia energética 2020.

Rakha H., Lucic I., Demarchi S., Setti J., and Van Aerde M. (2001), Vehicle Dynamics Model for Predicting Maximum Truck Accelerations, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127(5), Oct., pp. 418-425.

Rakha, H., Ahn, K., Moran, K., Saerens, B., and Van den Bulck, E. (2011), " Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel Consumption Model: Model Development and Testing," *Transportation Research Part D: Transport and Environment* pp492-503.

Ribeiro V., Costa A., Rodrigues J. (2013) Mining Geographic Data for Fuel Consumption Estimation

Route Builder, (2009), [http://www.hybridgeotools.com/html/3d\\_route\\_builder.html](http://www.hybridgeotools.com/html/3d_route_builder.html)

Saerens, B., Rakha, H., Ahn, K., and Van den Bulck, E. (2013), "Assessment of Alternative Polynomial Fuel Consumption Models for use in ITS Applications," *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*.

Secretaría de Planificación de Transporte Sectra (1999), Indicadores de movilidad [http://www.sectra.gob.cl/Indicadores\\_de\\_Movilidad/Indicadores/tasa\\_viajes.html](http://www.sectra.gob.cl/Indicadores_de_Movilidad/Indicadores/tasa_viajes.html) [Acceso 01 de Diciembre 2014].

The Altoona Bus Research and Testing Center (2014), [Altoonabustest.org](http://Altoonabustest.org). [Acceso 13 de Septiembre 2014].

Universidad Diego Portales, (2012), Diagnóstico Del Transporte Urbano en Chile.