



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Estimación de la carga de vehículos pesados a partir de datos de telemetría.

Trabajo previo a la obtención del título de:
INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ.

Nombre del autor:

Bryan Simón Parrales Vidal.

Nombre del director:

PhD. Daniel Cordero Moreno.

Nombre del codirector:

Msc. Oscar Serrano Guevara.

Cuenca – Ecuador

2024

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Simón y Teresa, que me han acompañado en todo momento de forma incondicional, impulsándome a superarme siempre en todos los ámbitos de la vida.

A mi esposa Johanna, que con su amor y paciencia ha estado en los mejores y peores momentos de mi vida.

A mis hijas, Gianna y Emma que han sido mi motor y mayor inspiración para seguir creciendo.

A mis hermanos Joe e Isis, ustedes han sido mis segundos padres, aconsejándome en todas mis decisiones.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, que ha escuchado siempre cada una de mis oraciones, haciendo posible este logro.

A mi papá que gracias a su experiencia como docente universitario fue un guía en este trabajo investigativo.

Agradezco al Ing. Daniel Cordero por la enseñanza y tutoría brindada durante mi carrera universitaria y trabajo de titulación.

Al Ing. Óscar Serrano y al PhD. José Ignacio Huertas, que desde la distancia siempre me han brindado el soporte necesario para hacer posible esta investigación.

Además, agradezco al Ing. Gustavo Álvarez por sus consejos y sus palabras de motivación que siempre brindó a cada uno de los estudiantes.

A la Universidad del Azuay, a la Facultad de Ciencias y Tecnología y los docentes que la conforman por haber compartido sus conocimientos a lo largo de esta carrera profesional.

Índice

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
I. INTRODUCCIÓN	7
II. METODOLOGÍA USADA	9
III. IDENTIFICADORES	12
IV. CONCLUSIONES	14
V. REFERENCIAS	14

Índice de tablas

Tabla 1. Características técnicas del vehículo.	10
Tabla 2. Especificaciones técnicas del dispositivo de telemetría. (fuente – investigación de huertas).....	10
Tabla 3. Datos importantes entregados por dispositivo de telemetría.....	10
Tabla 4. Bitácora de carga transportada reportada por el RNDC.....	12
Tabla 5. Valores de Cf y Consumo estimado con 30% de eficiencia térmica y carga reportada transportada.....	12
Tabla 6. Error absoluto y relativo del consumo energético de los viajes con 30% de eficiencia térmica y el valor de carga reportada.....	12
Tabla 7. Carga y consumo estimado con 30% de eficiencia térmica.	12
Tabla 8. Error absoluto y relativo del consumo energético de los viajes con 30% de eficiencia térmica y carga estimada	13
Tabla 9. Eficiencia térmica del motor y consumo estimado usando la carga registrada en la bitácora.....	13
Tabla 10. Eficiencia térmica del motor y consumo estimado usando la carga registrada en la bitácora.....	13
Tabla 11. Bitácora de los viajes realizados por el camión International.	13
Tabla 12. Eficiencia estimada por Solver de los viajes usando la masa total real del vehículo...	13
Tabla 13. Carga estimada por Solver de los viajes usando una eficiencia térmica del motor del 56%	14
Tabla 14. Error absoluto y relativo de la carga estimada de los viajes usando la eficiencia térmica del motor del 56%	14

Índice de figuras

Figura 1. Resultado del análisis de correlación realizado entre el consumo de combustible acumulado estimado y el real. Fuente: Huertas, et al (2022). Real vehicle fuel consumption in logistic corridors.	9
Figura 2. Metodología propuesta.....	9
Figura 3. Configuración vehicular usada para el transporte de carga en la ruta Buenaventura – Bogotá en el año 2019. Fuente: https://rncd.mintransporte.gov.co	10
Figura 4. Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes. Fuente: Resolución 4100 del 2004.....	10
Figura 5. Dispositivo de telemetría Geotab GO9 utilizado para la investigación. Fuente: https://www.geotab.com/es/go9-support-document/	10
Figura 6. Aplicación de la herramienta Solver para la variación de masa	12
Figura 7. Correlación lineal del viaje 5 con eficiencia térmica del 30% y carga estimada por solver.....	13

Resumen

En América Latina, el transporte de carga por carretera juega un papel crucial en la cadena de suministro, es responsable aproximadamente del 90% de las cargas transportadas en la región. Sin embargo, la falta de registros precisos sobre la actividad de toneladas despachadas y la carencia de estadísticas sobre los envíos por kilómetro transportado plantean desafíos significativos en la gestión eficiente de este sector. En ese sentido, el estudio se centró en abordar esta problemática, proponiendo la utilización de datos de telemetría como una herramienta clave para estimar la carga de vehículos pesados. El estudio analizó 9 camiones marca Kenworth modelo T800 del año 2012, en una ruta que va desde el Puerto de Buenaventura hasta Bogotá, en Colombia. Para el análisis se utilizaron cinco dispositivos de telemetría con los cuales se calculó la carga transportada. Por lo tanto, el enfoque no solo buscó abordar la falta de registro preciso de la carga transportada, sino que también se presentó una metodología basada en la telemetría para mejorar la eficiencia y la exactitud en la estimación de la masa de vehículos pesados. La masa se estimó con la obtención de todos los datos reales posibles, incluyendo la eficiencia del motor y se dedujo en esta investigación que para estimar la masa del vehículo lo más cercano a la real, se debe considerar una eficiencia del motor de $56,4\% \pm 12,5\%$, por cuanto los vehículos que se utilizaron están equipados con motores a diésel.

Abstract

In Latin America, road freight transport plays a crucial role in the supply chain, accounting for approximately 90% of the cargo transported in the region. However, the lack of accurate records on tonnage activity and statistics on shipments per kilometer transported poses significant challenges to the efficient management of this sector. This study addresses this issue by proposing the use of telemetry data as a key tool for estimating heavy vehicle loads. The study analyzed nine 2012 Kenworth T800 trucks on a route from the Port of Buenaventura to Bogota, Colombia. Five telemetry devices were used to calculate the load transported. This approach not only seeks to address the lack of accurate recording of transported cargo but also presents a telemetry-based methodology to improve efficiency and accuracy in estimating the mass of heavy vehicles. Mass was estimated by obtaining real data, including engine efficiency. The research deduced that to estimate the vehicle mass as accurately as possible, an engine efficiency of $56.4\% \pm 12.5\%$ should be considered, given that the vehicles used are equipped with diesel engines.

ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE VEHÍCULOS PESADOS A PARTIR DE DATOS DE TELEMETRÍA.

Bryan Parrales Vidal
Universidad del Azuay
Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz
Cuenca, Ecuador
bryanparrales@es.uazuay.edu.ec

Daniel Cordero Moreno
Universidad del Azuay
Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz
Cuenca, Ecuador
dacorderom@uazuay.edu.ec

Oscar Serrano Guevara
Tecnológico de Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Monterrey, México
oserrano@tec.mx

Resumen. En América Latina, el transporte de carga por carretera juega un papel crucial en la cadena de suministro, es responsable aproximadamente del 90% de las cargas transportadas en la región. Sin embargo, la falta de registros precisos sobre la actividad de toneladas despachadas y la carencia de estadísticas sobre los envíos por kilómetro transportado plantean desafíos significativos en la gestión eficiente de este sector. En ese sentido, el estudio se centró en abordar esta problemática, proponiendo la utilización de datos de telemetría como una herramienta clave para estimar la carga de vehículos pesados. El estudio analizó 9 camiones marca Kenworth modelo T800 del año 2012, en una ruta que va desde el Puerto de Buenaventura hasta Bogotá, en Colombia. Para el análisis se utilizaron cinco dispositivos de telemetría con los cuales se calculó la carga transportada. Por lo tanto, el enfoque no solo buscó abordar la falta de registro preciso de la carga transportada, sino que también se presentó una metodología basada en la telemetría para mejorar la eficiencia y la exactitud en la estimación de la masa de vehículos pesados. La masa se estimó con la obtención de todos los datos reales posibles, incluyendo la eficiencia del motor y se dedujo en esta investigación que para estimar la masa del vehículo lo más cercano a la real, se debe considerar una eficiencia del motor de $56,4\% \pm 12,5\%$, por cuanto los vehículos que se utilizaron están equipados con motores a diésel.

Palabras claves: telemetría, transporte de carga, consumo de combustible, regresión, correlación, análisis de datos de eficiencia de combustible.

Abstract. In Latin America, road freight transport plays a crucial role in the supply chain, accounting for approximately

90% of the cargo transported in the region. However, the lack of accurate records on tonnage activity and statistics on shipments per kilometer transported poses significant challenges to the efficient management of this sector. This study addresses this issue by proposing the use of telemetry data as a key tool for estimating heavy vehicle loads. The study analyzed nine 2012 Kenworth T800 trucks on a route from the Port of Buenaventura to Bogotá, Colombia. Five telemetry devices were used to calculate the load transported. This approach not only seeks to address the lack of accurate recording of transported cargo but also presents a telemetry-based methodology to improve efficiency and accuracy in estimating the mass of heavy vehicles. Mass was estimated by obtaining real data, including engine efficiency. The research deduced that to estimate the vehicle mass as accurately as possible, an engine efficiency of $56.4\% \pm 12.5\%$ should be considered, given that the vehicles used are equipped with diesel engines.

Key words: telemetry, freight transport, fuel consumption, regression, correlation, fuel efficiency data analysis.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte de carga asume un rol muy importante en la cadena de suministro; sin embargo, el uso de este medio ha incrementado los impactos negativos sobre el medio ambiente. En América Latina aproximadamente el 90% de la carga transportada son enviadas por transporte de carretera, mientras que, en América Central el 30% de las exportaciones intrarregionales son transferidas por este mecanismo (Barbero et al. 2020).

En el transporte por carretera, una de las mayores debilidades es la carencia de registro en el nivel de actividad de las toneladas despachadas (Barbero y Guerrero, 2017) y su principal problema es la falta de estadísticas sobre los envíos de toneladas por kilómetros transportados. En Colombia, según la Oficina de Regulación Económica, se estima solo un registro del 40% de los viajes realizados (Barbero et al. 2020). La ausencia de registro del cien por ciento de carga transportada en el país ocasiona a los gobiernos de turno afronten informalidad, fuga de impuestos y falta de control de la generación de gases de efecto invernadero del sector.

En Ecuador, el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), mantiene en sus registros la matriculación vehicular realizada en el país; mientras que las cargas que entran o salen del territorio nacional por vía marítima o aérea carecen de un control de la cantidad de viajes efectuados. Esta situación ocasiona un retraso en temas de comparación con otros países de la región que han logrado, gracias a este control, combatir la informalidad y controlar las emisiones contaminantes en su territorio.

En un estudio realizado por Jara y Pineda (2019), expresan que: “La dinámica de vehículos es una parte importante para el cálculo del consumo de energía, debido a que en ella se consideran las resistencias que se oponen al avance del automóvil”. En ese sentido, según Domínguez y Ferrer (2012), señalan que las fuerzas que generan resistencia al vehículo se representan con las ecuaciones siguientes:

- 1) Fuerza de arrastre (F_d): Según Darryl Leiter (2019) es también conocida como la ecuación de resistencia al aire, fue formulada originalmente por el científico británico George Gabriel Stokes (1880) en el siglo XIX; o identificada como la Ley de Stokes y describe la fuerza de arrastre experimentada por un objeto en movimiento a través de un fluido, como el aire o el agua. En cambio, para Gillespie (1992) es la fuerza que ejerce el aire sobre el vehículo en dirección opuesta al movimiento del vehículo. En esta fuerza interviene la aerodinámica del vehículo.

$$F_d = 0.5 * C_d * \rho * A * V^2 \quad [N] \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde C_d es el Coeficiente de arraste del vehículo, ρ es la densidad del aire [Kg/m^3], A es el área frontal del vehículo [m^2] y V es la velocidad del vehículo [m/s].

- 2) Resistencia a la pendiente (R_g): Según Gillespie (1992) es la fuerza que origina la resistencia de un vehículo al subir en una pendiente, del cual interviene la inclinación del suelo en la que se encuentra el vehículo y la masa total del vehículo.

$$R_g = m * g * \text{sen}(\theta) \quad [N] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde m es la masa total del vehículo [Kg], g es la gravedad. [m/s^2] y θ ángulo [Rad].

- 3) Resistencia a la rodadura (R_x): Según Gillespie (1992) indica que es la resistencia que tiene el neumático a rodar sobre un tipo de suelo.

$$R_x = f_r * m * g * \cos(\theta) \quad [N] \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde f_r es una magnitud que expresa la fuerza opuesta al movimiento y es directamente proporcional al peso soportado por el neumático, m es la masa total del vehículo. [Kg], g es la gravedad. [m/s^2] y θ ángulo [Rad].

- 4) Resistencia a la inercia (R_i): Es la fuerza que se opone al vehículo según sus cambios de velocidad, (Según Gillespie 1992).

$$R_i = m * a \quad [N] \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde m es la masa total del vehículo [Kg]. a es la aceleración positiva o negativa del vehículo [m/s^2].

La sumatoria de estas fuerzas da como resultado la fuerza requerida en la rueda (F_x) que es representada a través de la siguiente ecuación:

$$F_x = F_d + R_g + R_x + R_i \quad [N] \quad (\text{Ec. 5})$$

Por consiguiente, determinar la fuerza requerida en la rueda es de vital importancia para el cálculo del consumo energético de cualquier automóvil. En ese sentido, el estudio de Huertas et al. (2022) muestra que para determinar el consumo energético de un vehículo se necesita encontrar el flujo volumétrico de combustible instantáneo, para ello se necesita previamente encontrar la potencia entregada por el motor, mediante la siguiente ecuación:

$$P = F_x * V \quad [W] \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde F_x es la Fuerza en la rueda. [N] y donde V es la velocidad del vehículo [m/s^2]

Pulkrabek (1997) menciona que “la cantidad de energía (potencia) disponible para su uso en el motor”, se determina con la ecuación siguiente:

$$v_f = P_x / \rho_f * LHV * \eta_{th} * \eta_m \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde v_f es el flujo volumétrico del combustible [l/s], P_x es la potencia entregada [W], ρ_f es la densidad del combustible [kg/m^3], LHV es el valor calorífico inferior del combustible [kJ/kg], η_{th} es la eficiencia térmica del motor y η_m es la eficiencia mecánica del motor.

A partir de lo expuesto, la masa se utiliza para determinar el consumo energético de los vehículos, esta información se puede obtener con la ayuda de una báscula para conocer el peso del vehículo, sin embargo, en vehículos de transporte de carga es muy difícil conseguir ese detalle, por cuanto, no siempre se podrá colocar este tipo de vehículos en básculas

para obtener su peso. El resto de los datos lo podemos conseguir mediante el uso de la telemetría. De acuerdo con la Real Academia Española, s.f., la telemetría se refiere al “Conjunto de técnicas para la medida a distancia de magnitudes físicas.” En este contexto, se exploraron diversas teorías, entre las cuales se destaca el análisis de Gallego (2022) donde resalta la eficacia de un sistema preventivo excepcional capaz de modificar instantáneamente diversos parámetros del vehículo, tales como la velocidad, el frenado y los arranques, con el objetivo de mejorar su rendimiento en tiempo real. Asimismo, Bedolla Nahomi (2019) dice que la telemetría se compone de tres elementos fundamentales: (i) La primera parte engloba el sistema de recopilación de información. (ii) La segunda parte se refiere al medio de comunicación utilizado para transmitir los datos al destino final. (iii) La tercera parte comprende el sistema de notificación y visualización. (pp. 21-22).

Por otro lado, Barrón. et al. (2018) señala que para muchas empresas transportistas les resulta útil monitorear la operación de vehículo durante los viajes con el fin de controlar el rendimiento del vehículo y así tomar decisiones oportunas. Para ellos, el uso de telemetría está disponible para la gestión de flotillas, con la finalidad de obtener información bastante útil a partir de la lectura de la computadora del tractocamión, tales como: (i) Eficiencia en el uso de combustible; (ii) consumo de combustible en ralentí; (iii) odómetro; (iv) Horas ralentí; (v) horas totales de trabajo; (vi) rendimiento real; (vii) velocidad de motor; y, (viii) voltaje de batería, temperaturas de aceite y refrigerante. Esta información obtenida por la telemetría es aplicada en las ecuaciones de dinámica vehicular, dejando a la masa como la única variable a encontrar.

En la investigación efectuada por Huertas y otros, se realiza la comparación de los datos reales con los estimados mediante una correlación lineal esto se puede observar en la Figura 1, que según Rubin y Ramos (2010) señalaron que “Los análisis de regresión y correlación nos mostrarán cómo determinar tanto la naturaleza como la fuerza de una relación entre dos variables.” Para ello, se usa la ecuación de la recta en donde la variable dependiente Y está determinada por la variable independiente X .

$$y = aX + b \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde a es la pendiente de la recta y b es la ordenada de la “ y ”.

Huertas expresa que la pendiente a la que la llaman C_f evalúa la precisión del modelo y a su vez se la utiliza como un factor de calibración del modelo, es decir, si mi pendiente (C_f) es igual a 1, el consumo real y el estimado del vehículo, aproximadamente serán iguales.

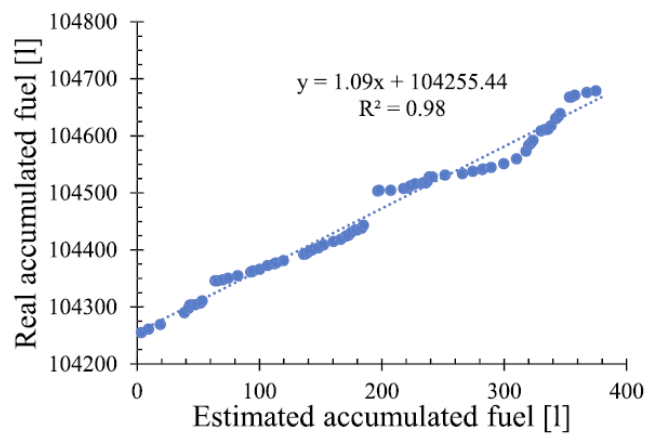


Figura 1. Resultado del análisis de correlación realizado entre el consumo de combustible acumulado estimado y el real. Fuente: Huertas, et al (2022). Real vehicle fuel consumption in logistic corridors.

A partir de lo expuesto, el estudio plantea como objetivo determinar la carga transportada por vehículos pesados a partir de datos de telemetría, obteniendo los parámetros de operación real, estimando así, la carga transportada de los vehículos analizados. En ese aspecto, el estudio plantea como hipótesis identificar si existe correlación significativa entre los datos reales de la carga pesada con los datos de la carga estimada.

II. METODOLOGÍA USADA

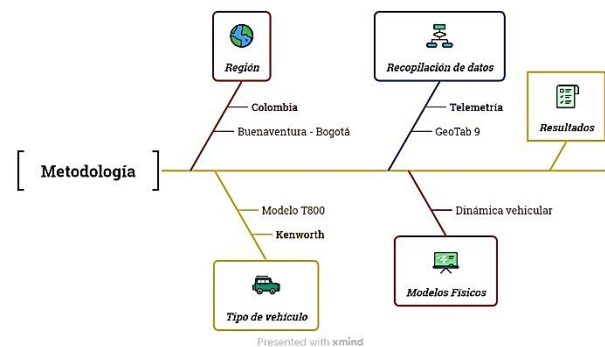


Figura 2. Metodología propuesta.

Siguiendo la metodología representada en la Figura 2. El estudio se realizó en la región de Colombia, exactamente en la ruta que conlleva desde el puerto de Buenaventura hasta Bogotá. En el 2019, según el Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC), solo en esta ruta se realizaron 94.206 viajes de los cuales se transportaron un total de 1 694 732,94 toneladas de distintos tipos de carga como cemento, abono, materiales de construcción, etc.

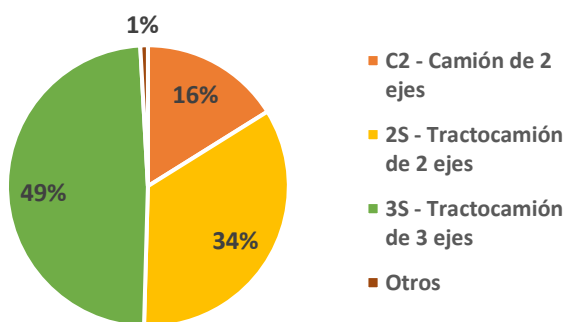


Figura 3. Configuración vehicular usada para el transporte de carga en la ruta Buenaventura – Bogotá en el año 2019. Fuente: <https://rncd.mintransporte.gov.co>

Se usaron cinco vehículos tipo tractocamión de marca Kenworth, modelo T800 del año 2012 que contiene tres ejes con semirremolque de tres ejes o 3S3, denominado así por el Ministerio de Transporte de Colombia (2004) conforme la resolución 4100 del 2004, su peso máximo o peso bruto vehicular es de 52 toneladas y cuenta con una tecnología EPA 98 o EURO III. Con el trabajo efectuado por Alvear John y Sánchez Guillermo (2023), se obtuvo el Cd que es el coeficiente de arrastre y el área frontal, además, indicaron que se determinó el Cd del modelo T800 utilizando un software CAD y la densidad del aire usado fue de 1kg/m³. La hoja técnica del vehículo en IPESA camiones (2021) indica que el tractocamión posee una transmisión EATON RTLO de 18 velocidades, las especificaciones de este vehículo, necesarias para la investigación, la podemos observar en la Tabla 1.

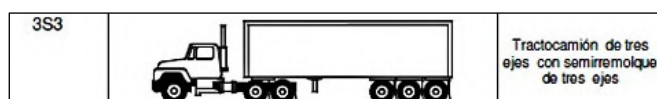


Figura 4. Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes. Fuente: Resolución 4100 del 2004.

Tabla 1.
Características técnicas del vehículo.

Kenworth modelo T800	
Año del vehículo	2012
Relación de transmisión	18 velocidades 14,40/12,29/8,56/7,30/6,05/ 5,16/4,38/3,74/3,20/2,73/ 2,29/1,95/1,62/1,38/ 1,17/1,00/0,86/0,73
Relación del diferencial	4,30
Factor de masa por cada cambio	13,06/10,10/5,86/4,72/3,73/ 3,12/2,64/2,29/2,02/1,81/ 1,64/1,51/1,40/1,33/ 1,26/1,22/1,18/1,15
Área frontal	9,07 m ²
Coefficiente de arrastre	0,74
Tecnología control de emisiones	EPA 98 o EURO III

Fuente: tomado de IPESA camiones (2021).

La información de telemetría otorgada por el dispositivo GO9, tomada de la base de datos de Geotab y proporcionados por el Tecnológico de Monterrey, es llevado por un

procesamiento de filtración para obtener los datos necesarios como se muestran en la tabla 2 y que usando interpolación podemos obtenerlos segundo a segundo, debido que el dispositivo GO9 no obtiene los datos con una frecuencia constante, sino que toma los datos reportados por la unidad de control del motor (ECU).



Figura 5. Dispositivo de telemetría Geotab GO9 utilizado para la investigación. Fuente: <https://www.geotab.com/es/go9-support-document/>

Tabla 2.
Especificaciones técnicas del dispositivo de telemetría

Variable	Instrumento / Aplicación	Características técnicas
Posición, Velocidad	GO9 / Geotab	Posición: -2m Velocidad: -0.05 m/s Frecuencia no constante.
Consumo de combustible acumulado		Reportado por la unidad de control (ECU). A través del puerto de diagnóstico. Basado en la NASA. Resolución: ~90 m
Altitud	Elevación digital modelo de GPS Visualizer	

Fuente: Huertas, et al (2022). Real vehicle fuel consumption in logistic corridors.

En virtud que el dispositivo no nos entrega la información de la pendiente de carretera en que se encuentra el vehículo, pero si las coordenadas, entonces podemos determinar la altitud y pendiente mediante la herramienta GPS Visualizer (Schneider, 2019). Esta herramienta procesa datos emitidos por un dispositivo GPS, como latitud y longitud, el cual realiza un mapeo y perfiles de elevación a partir de estos datos geográficos.

Tabla 3.
Datos importantes entregados por dispositivo de telemetría.
Datos necesarios para la realización del trabajo.

Dato	Unidades
Velocidad	m/s
Longitud	° (Grados decimales)
Latitud	° (Grados decimales)
Combustible acumulado	L (Litros)
Flujo volumétrico	L/s
Aceleración	m/s ²
Distancia recorrida	m

Además, de los datos otorgados por el equipo de telemetría, se necesitó de otros factores como los que se muestran en la Ec.1, donde el Cd, el área frontal y densidad del aire se debe conocer mediante cálculo o estimaciones, tal como el trabajo realizado por Alvear John y Sánchez Guillermo (2023), que obtuvieron estos datos mediante un software de CAD. En la Ec. 3, el factor a conocer es el coeficiente de resistencia a la rodadura para camiones, según Gillespie, se puede obtener con la siguiente fórmula.

$$fr = (0,0041 + 0,000041V)C_h \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde C_h es el coeficiente de la superficie el cual se usó el valor de 1.2 que es para concreto caliente o asfalto frío y V es la velocidad en MPH.

Para obtener la resistencia a la inercia, se utiliza la masa equivalente a las inercias rotacionales de los componentes del tren motriz. De acuerdo con Gillespie (1992), “La fuerza de tracción generada por motor/tren de potencia es el esfuerzo disponible para superar las fuerzas de carga de la carretera y acelerar el vehículo. La fuerza de tracción en el suelo incluye los términos de par motor e inercia rotacional, estas se combinan con la masa del vehículo llamada masa efectiva (me) y la relación entre ellas es el factor de masa”. Para encontrar esta masa usamos las siguientes formulas:

$$Ntd = i * if \quad (\text{Ec. 10})$$

$$Mf = 1 + 0,04Ntd + 0,0025Ntd^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

$$Me = M * (Mf - 1) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde Ntd es la relación combinada de la transmisión y el diferencial. Donde i es la relación de transmisión de cada cambio; y, if es la relación de transmisión final. Estos datos lo podemos ver en la tabla 1.

El factor de masa (mf) depende del número de cambio y velocidad en que se encuentre la transmisión y el vehículo respectivamente. Para esta investigación el factor de masa por cada cambio es el que se muestra en la tabla 1.

Se utilizó la ecuación 5 que es la sumatoria de todas las fuerzas con el fin de determinar la potencia en la rueda y la ecuación 6 para establecer el consumo, en donde solo se necesitó la potencia positiva, es decir, se realizó la filtración de los datos a través de Excel.

Una vez obtenida la potencia positiva, con ella podemos encontrar el flujo másico segundo a segundo aplicando la siguiente fórmula:

$$m_f = \frac{Pe}{\eta_m \eta_{tk} LHV} [kg/s] \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde η_m es la eficiencia mecánica, según Pulkrabek (1997), la eficiencia mecánica de un motor oscila entre el 75% a 95%. Para esta investigación se usó el porcentaje del 95%. η_{tk} , para Pulkrabek es la eficiencia térmica del motor, y en motores de encendido por compresión es mayor al 50% en un caso ideal y LHV es el poder calorífico del combustible.

El siguiente paso es descubrir el flujo volumétrico que se lo obtiene con la ecuación siguiente:

$$v_f = \frac{m_f}{\rho} [L/s] \quad (\text{Ec. 14})$$

En la deducción también se pudo agregar el consumo en ralentí, gracias a la telemetría que nos da esa información cuando el vehículo está en ralentí, dicho detalle se pudo agregar a los datos cuando la velocidad es 0 km/h para así realizar el cálculo estimado lo más cercano a lo real.

La suma total del flujo volumétrico, al ser un dato segundo a segundo, representa el consumo total del vehículo en el trayecto realizado. Con este consumo total estimado podemos efectuar la comparación con el consumo total real entregado por el dispositivo de telemetría.

Con ayuda de la herramienta Solver, se logrará buscar que se verifique las condiciones del Cf = 1 y un R^2 cercano a 1 y así concluir con el objetivo de nuestra investigación. Al cumplirse esto, el consumo calculado de combustible debe ser cercano o igual al consumo real de combustible otorgado por el dispositivo de telemetría.

Solver es una herramienta de Excel que acopla valores variables de una celda para que satisfaga los límites de las celdas de restricción y den un resultado deseado, es decir, modifica las mismas para encontrar un valor máximo o mínimo deseado. Solver utiliza distintos métodos numéricos para la optimización de ecuaciones. En este trabajo investigativo el método que se usó fue el GRG Nolinear (Gradiente reducido generalizado) empleado para problemas no lineales, según Gonzáles (2015), “este algoritmo de programación no lineal, parte de una solución factible conocida como punto inicial. El algoritmo intenta entonces moverse a partir este punto en una dirección a través de la región factible, de tal forma que el valor de la función objetivo mejore.”

En la Figura 6. se observa cómo se aplica las restricciones o condiciones en la herramienta Solver para variar la masa. En la sección donde dice: “Establecer Objetivo”, colocamos la celda donde va el valor del R^2 y colocamos la opción de “Max” para que el programa dé el valor máximo posible. En la sección “Cambiando las celdas de variables” colocamos la celda donde va el valor de la carga y será el que va a variar para cumplir las restricciones. Por último, en la sección “Sujeto a las restricciones” colocamos la restricción, en este caso es la celda del Cf o pendiente, registrando que este importe debe ser igual a 1.

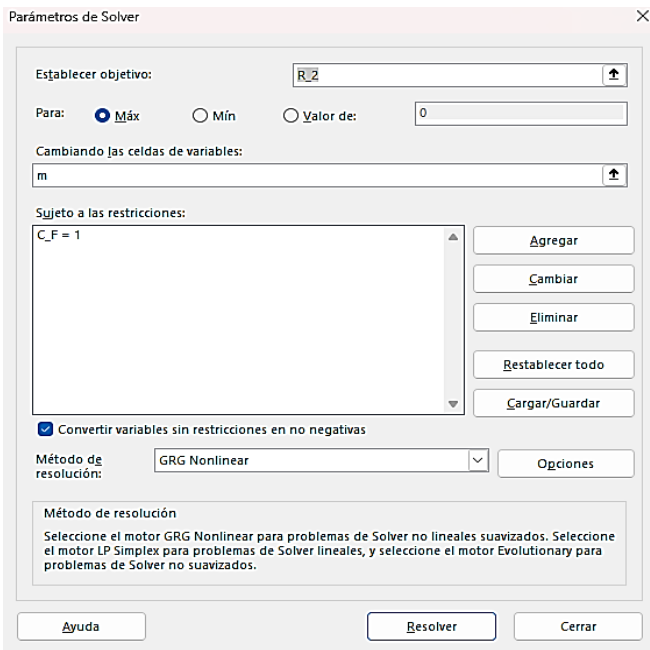


Figura 6. Aplicación de la herramienta Solver para la variación de masa.

III. IDENTIFICADORES

Se analizó nueve viajes realizados con el mismo modelo de vehículo y según el RNDC reporta la carga transportada como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

Bitácora de carga transportada reportada por el RNDC

Viaje	Placa del vehículo	Carga Transportada	Masa total vehicular
1	SSQ108	34 000 kg	43 000 kg
2	SSQ108	35 000 kg	44 000 kg
3	SSQ108	34 000 kg	43 000 kg
4	SSQ108	34 000 kg	43 000 kg
5	TAU600	35 000 kg	44 000 kg
6	TAU600	34 000 kg	43 000 kg
7	TAV190	35 000 kg	44 000 kg
8	TAU772	34 000 kg	43 000 kg
9	TAU972	34 000 kg	43 000 kg

Para este cálculo es fundamental tener todas las variables. Una variable importante es la eficiencia térmica y mecánica del motor y para saber con exactitud, lo correcto, sería colocar el motor del vehículo en un banco dinamométrico y efectuar los cálculos respectivos para obtener una eficiencia real, lamentablemente, en esta investigación no fue posible. Según Cengel (2009), la eficiencia real de los motores a diésel, oscila entre el 35% a 45% todo esto depende del estado del motor y de la calidad del combustible, debido a la edad del vehículo se tomó un valor del 30%, cuyos resultados del Cf y el consumo estimado con los datos reportados de la carga son los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Valores de Cf y Consumo estimado con 30% de eficiencia térmica y carga reportada transportada.

Viaje	Carga transportada	Cf	Consumo real	Consumo estimado
1	34 000 kg	0,56	414,55 L	741,10 L

Viaje	Carga transportada	Cf	Consumo real	Consumo estimado
2	35 000 kg	0,54	419,07 L	732,38 L
3	34 000 kg	0,55	424,12 L	734,66 L
4	34 000 kg	0,49	389,99 L	739,87 L
5	35 000 kg	0,53	422,91 L	776,01 L
6	34 000 kg	0,66	433,31 L	621,05 L
7	35 000 kg	0,51	417,99 L	800,21 L
8	34 000 kg	0,55	422,50 L	747,51 L
9	34 000 kg	0,51	401,00 L	746,66 L

Utilizando el valor carga reportado con una eficiencia térmica del 30%, el cálculo muestra un Cf promedio de 0,54 lo cual no cumple con el Cf deseado, además, el consumo estimado varía del real, como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6.

Error absoluto y relativo del consumo energético de los viajes con 30% de eficiencia térmica y el valor de carga reportada.

Viaje	Carga transportada	Cf	Error absoluto	Error relativo
1	34 000 kg	0,56	327,15 L	78,92 %
2	35 000 kg	0,54	313,31 L	74,76 %
3	34 000 kg	0,55	310,54 L	73,22 %
4	34 000 kg	0,49	349,88 L	89,72 %
5	35 000 kg	0,53	353,10 L	83,49 %
6	34 000 kg	0,66	187,14 L	43,33 %
7	35 000 kg	0,51	382,22 L	91,44 %
8	34 000 kg	0,55	325,01 L	76,93 %
9	34 000 kg	0,51	345,66 L	86,20 %

Utilizando la herramienta Solver se modificó la variable de masa, colocando las restricciones correspondientes para que el Cf sea igual a uno, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7. Los promedios de la carga estimada de los vehículos y viajes analizado en la Tabla 7 es de 14 054 kg y del consumo estimado es de 401,06 L, este dato es muy cercano al consumo real, como se puede apreciar en la Tabla 8, en donde se muestra el error absoluto y relativo del consumo real con el estimado, dando un error relativo promedio de 3,65%. Al realizar la gráfica comparativa, podemos ver en la figura 7 la relación lineal entre las dos variables, dando así un Cf = 1 y un $R^2 = 0,99$.

Tabla 7.

Carga y consumo estimado con 30% de eficiencia térmica.

Viaje	Placa del vehículo	Carga estimada	Consumo real	Consumo estimado
1	SSQ108	13 578 kg	414,55 L	404,53 L
2	SSQ108	14 116 kg	419,07 L	400,45 L
3	SSQ108	13 737 kg	424,12 L	406,83 L
4	SSQ108	11 333 kg	389,99 L	365,80 L
5	TAU600	13 358 kg	422,91 L	412,12 L
6	TAU600	21 414 kg	433,31 L	412,37 L
7	TAV190	12 608 kg	417,99 L	408,66 L
8	TAU772	14 139 kg	422,50 L	413,05 L
9	TAU972	12 206 kg	401,00 L	385,71 L

Tabla 8.
Error absoluto y relativo del consumo energético de los viajes con 30% de eficiencia térmica y carga estimada.

Viaje	Carga estimada	Error absoluto	Error relativo
1	13 578 kg	10,02 L	2,42 %
2	14 116 kg	18,62 L	4,44 %
3	13 737 kg	17,29 L	4,08 %
4	11 333 kg	24,19 L	6,20 %
5	13 358 kg	10,79 L	2,55 %
6	21 414 kg	20,94 L	4,83 %
7	12 608 kg	9,33 L	2,23 %
8	14 139 kg	9,45 L	2,24 %
9	12 206 kg	15,29 L	3,81 %

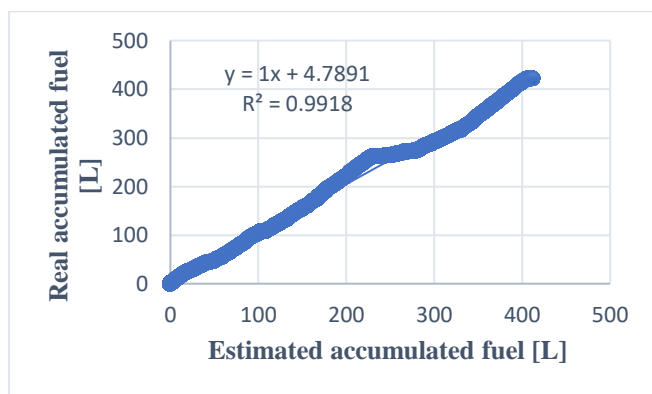


Figura 7. Correlación lineal del viaje 5 con eficiencia térmica del 30% y carga estimada por solver.

La información de la carga estimada que se muestra en la Tabla 8 no se acerca a la real; pero con el uso de la herramienta Solver podemos colocar la carga real transportada, teniendo en cuenta, la estimación de la eficiencia térmica que debe tener el motor para que el Cf sea igual a 1 con la carga real transportada que se encuentra registrada en la bitácora.

La Tabla 9, muestra la eficiencia térmica que debería tener el motor del vehículo para que, con la carga registrada en la bitácora, el consumo estimado sea cercano al real. El promedio de la eficiencia del motor de todos los viajes es del 56,40%, dicho valor cumple con lo que manifiesta Pulkrabek (1997) que la eficiencia de un motor de ciclo Diesel puede superar el 50%. El promedio del consumo estimado es de 402,99 L muy cercano al promedio real que es de 416,16 L, esta variación se contempla en la tabla 10.

Tabla 9.
Eficiencia térmica del motor y consumo estimado usando la carga registrada en la bitácora

Viaje	Placa del vehículo	η_{tk} Motor	Consumo real	Consumo estimado
1	SSQ108	55,81 %	414,55 L	404,52 L
2	SSQ108	55,72 %	419,07 L	400,49 L
3	SSQ108	55,97 %	424,12 L	406,82 L
4	SSQ108	62,29 %	389,99 L	365,90 L
5	TAU600	57,95 %	422,91 L	411,86 L
6	TAU600	45,96 %	433,31 L	412,40 L
7	TAV190	59,72 %	417,99 L	408,90 L

Viaje	Placa del vehículo	η_{tk} Motor	Consumo real	Consumo estimado
8	TAU772	54,52%	422,50 L	413,08 L
9	TAU972	59,66 %	401,00 L	385,56 L

Tabla 10.
Error absoluto y relativo del consumo energético de los viajes usando la carga reportada y la eficiencia estimada.

Viaje	η_{tk} Motor	Error absoluto	Error relativo
1	55,81 %	10,03 L	2,42 %
2	55,72 %	18,58 L	4,43 %
3	55,97 %	17,30 L	4,08 %
4	62,29 %	24,09 L	6,18 %
5	57,95 %	11,05 L	2,61 %
6	45,96 %	20,91 L	4,83 %
7	59,72 %	9,09 L	2,17 %
8	54,52 %	9,42 L	2,23 %
9	59,66 %	15,44 L	3,85 %

Para contrastar la investigación se procesó 10 viajes de la misma forma. Estos viajes fueron obtenidos de una tesis en desarrollo (David Peralta) de la Universidad del Azuay. Se escogió la ruta Catamayo – Chorrillo en el país Ecuador de los cuales 5 viajes se realizaron desde el cantón Chorrillo a Catamayo con carga y 5 viajes desde Catamayo a Chorrillo sin carga, monitoreando los viajes de los vehículos a través de telemetría. El vehículo usado fue un camión marca International modelo Prostar del año 2022 y en estos viajes se pesó el vehículo en una báscula, es decir, se conoce la masa real del camión. El detalle de la carga se muestra en la tabla 11.

Tabla 11.
Bitácora de los viajes realizados por el camión International.

Viaje	Ruta	Peso camión	Peso tanque	Peso de carga
1	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	21 820 kg
2	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	0 kg
3	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	26860 kg
4	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	0 kg
5	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	27 050 kg
6	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	0 kg
7	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	26 860 kg
8	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	0 kg
9	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	27 050 kg
10	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	0 kg

En este caso, como se conoce la masa total real, se procedió a estimar la eficiencia térmica del motor con el fin de verificar que el valor de la eficiencia sea superior al 50%.

Tabla 12.
Eficiencia estimada por Solver de los viajes usando la masa total real del vehículo.

Viaje	Peso en vacío	Peso de tanque	Masa total	Eficiencia estimada
1	23 310 kg	21 820 kg	45 130 kg	58,00 %
2	23 310 kg	0 kg	23 310 kg	61,96 %

Viaje	Peso en vacío	Peso de tanque	Masa total	Eficiencia estimada
3	23 310 kg	26 860 kg	50 170 kg	63,94 %
4	23 310 kg	0 kg	23 310 kg	54,83 %
5	23 310 kg	27 050 kg	50 360 kg	64,30%
6	23 310 kg	0 kg	23 310 kg	59,82%
7	23 310 kg	26 860 kg	50 170 kg	62,37 %
8	23 310 kg	0 kg	23 310 kg	60,48 %
9	23 310 kg	27 050 kg	50 360 kg	62,91 %
10	23 310 kg	0 kg	23 310 kg	61,55 %

La tabla 12, muestra la eficiencia térmica estimada de los viajes del camión Internacional, cuyo promedio representa el 61%; sin embargo, se colocó el porcentaje del 56% para estimar la masa total del vehículo, con el fin de usar el mismo dato del primer análisis y comparar los datos estimados. Esta variación se muestra en la tabla 13.

Tabla 13.

Carga estimada por Solver de los viajes usando una eficiencia térmica del motor del 56%

Viaje	Ruta	Peso camión	Peso tanque	Peso de carga estimada
1	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	20 209 kg
2	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	-2 414 kg
3	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	20 461 kg
4	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	546 kg
5	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	20 343 kg
6	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	-1 608 kg
7	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	21 589 kg
8	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	-1 850 kg
9	Cho – Cat	8 500 kg	14 810 kg	21 362 kg
10	Cat – Cho	8 500 kg	14 810 kg	-2 253 kg

Tabla 14.

Error absoluto y relativo de la carga estimada de los viajes usando la eficiencia térmica del motor del 56%

Viaje	Masa total estimada	Error absoluto	Error relativo
1	43 519 kg	1 611 kg	3,57 %
2	20 896 kg	2 414 kg	10,36 %
3	43 771 kg	6 399 kg	12,75 %
4	23 856 kg	546 kg	2,34 %
5	43 653 kg	6 707 kg	13,32 %
6	21 702 kg	1 608 kg	6,90 %
7	44 899 kg	5 271 kg	10,51 %
8	21 460 kg	1 850 kg	7,94 %
9	44 672 kg	5 688 kg	11,29 %
10	21 057 kg	2 253 kg	9,67 %

Al estimar la carga, usando la eficiencia del 56% notamos que existe una variación del valor real. El error relativo promedio es del 8,86% y el error absoluto promedio es de 3 434 kg, lo cual se pudo demostrar que usando el rendimiento térmico teórico del motor la estimación de la masa será muy cercana a la real.

IV. CONCLUSIONES

Por lo expuesto se concluye que para calcular el consumo energético es importante tener en cuenta las variables del vehículo (área frontal, relación de transmisión, masa, características del motor, coeficiente de arrastre), la operación del vehículo (velocidad, aceleración, eficiencia del motor, pendiente, ruta) y la condición de manejo que depende de cada conductor.

La eficiencia del motor es un factor importante en el cálculo de consumo energético, y para lograr el objetivo de esta investigación es necesario conocer el valor exacto de la capacidad térmica y mecánica del motor, el mismo que se lo obtiene colocando el motor en un banco de prueba para conocer su valor real. Sin embargo, en este estudio se determinó que, para que la masa estimada sea cercana a la real, se debe usar una eficiencia del motor del 56,4% \pm 12,5%.

V. RECOMENDACIONES

Se debe considerar los porcentajes de eficiencia expuesto en este trabajo investigativo para conocer la masa estimada muy cerca de la real. Además, queda abierto para efectuar un análisis con relación al “el estilo de conducción” que es mencionado en la investigación de Huertas, como lo muestra la tabla 4 que, con el consumo real entregado por el dispositivo de telemetría, los resultados varían aun utilizando el mismo modelo de vehículo, del mismo año y la misma ruta.

VI. REFERENCIAS

- Alvear, J., & Sánchez, G. (2023). *Análisis Dinámico de fluidos computacional CFD Aplicado en el rompavientos de los trailers de competencia*. Obtenido de https://rraae.cedia.edu.ec/Record/UTN_4c8de961944c06d32bd6734103af294d
- Barbero, J. A. (2020). *El transporte automotor de cargas en América Latina*. Obtenido de <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/10424>
- Barbero, J. A., & Guerrero, P. (2017). El transporte automotor de carga en América Latina: soporte logístico de la producción y el comercio. doi:<https://doi.org/10.18235/0000659>
- Bedolla Padilla, N. A. (2019). *Implementación del sistema de telemetría*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27061>
- Bottelli, Tanelli, Boniolo, & Savaresi. (2014). Online estimation of vehicle load and mass distribution for ground vehicles. *IFAC Proceedings*, pp. 8439-8444. doi:<https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01981>

- Colombia potencia a la vida. (29 de 04 de 2024). Obtenido de Colombia potencia a la vida: <https://rndc.mintransporte.gov.co/>
- Domínguez, & Ferrer. (2012). *Sistemas de transmisión y frenado*. Madrid: Editex.
- Gallego, C. (2022). *Desarrollo de aplicación para obtener datos de telemetría vehicular del servicio de monitoreo inteligente para la compañía Carguesa SAS ubicada en Itagüí – Antioquia*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/52275>
- GEOTAB. (29 de 04 de 2024). Obtenido de GEOTAB: <https://www.geotab.com/es/go9-support-document/>
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of vehicle Dynamics*.
- González, D. (2015). *Motores térmicos y sus SIstemas Auxiliares*. Madrid: Ediciones paraninfo. Obtenido de <https://web.instipp.edu.ec/Libreria/libro/351263739-MOTORES-TERMICOS-Y-SUS-SISTEMAS-AUXILIARES-DAVID-GONZALEZ-CALLEJA-pdf.pdf>
- Huertas, J. I., Serrano-Guevara, O. S., Díaz-Ramírez, J., Prato, D., & Tabares, L. (2022). *Real vehicle fuel consumption in logistic corridors*. *Applied Energy*, 314, 118921. . Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118921>
- IPESA Camiones. (2021). *Ficha Técnica Kenworth T800*. Obtenido de [https://www.ipesa.com.pe/uploads/Ficha-Tecnica-Kenworth-T800-2-1%20\(1\).pdf](https://www.ipesa.com.pe/uploads/Ficha-Tecnica-Kenworth-T800-2-1%20(1).pdf)
- Jara, W., & Pineda, J. (2019). *Determinación de la demanda energética de vehículos motorizados Ciclo Otto pertenecientes a la Subcategoría M1, para el servicio de taxi en la ciudad de Cuenca*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17954>
- Leiter, D. (2019). *A to Z of Physicists, Updated Edition*. Obtenido de https://www.google.com.ec/books/edition/A_to_Z_of_Physicists_Updated_Edition/ItyPEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=book+%22On+the+Motion+of+Incompressible+Fluids%22+1845&pg=PA306&printsec=frontcover
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2004). *Resolución 001400*. Obtenido de <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241#:~:text=Por%20la%20cual%20se%20adoption,red%20vial%20a%20nivel%20nacional.>
- Peipei, L. (2015). *Identification of mass and road slope of heavy hydraulic transmission vehicle*. . Beijing: Beijing Institute of Technology.
- Pulkrabek, W. W. (1997). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- Rubin, & Ramos. (2010). *Estadísticas para Administración y Economía*. México: Prentice Hall.
- Schneider, A. (2019). *Visualizador GPS: mapeo que puede hacer usted mismo*. Obtenido de <https://www.gpsvisualizer.com/>
- Stokes, G. G. (1880). *On the Steady Motion of Incompressible Fluids*. Cambridge University Press. Obtenido de <https://www.cambridge.org/core/books/abs/mathematical-and-physical-papers/on-the-steady-motion-of-incompressible-fluids/FA298D24646A9BF83FF077036A9287A3>
- Sung-Wan, Da-Woon, Dong-Uk, Sung-Jin, & Jae-Bong. (2022). *Vehicle Load Estimation Using the Reaction Force of a Vertical Displacement Sensor Based on Fiber Bragg Grating*. *Sensors*, pp. 1-23. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1572>
- Yi, Yongbing, Li, & Bihui. (2024). *Quality Estimation Method of Heavy Vehicle Based on Speed Change*. *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-10. Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1650/2/022038/pdf](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1650/2/022038/pdf)