

## **ALTERNATIVAS PARA LA MITIGACIÓN DEL CO<sub>2</sub> ASOCIADO AL TRANSPORTE TERRESTRE LOGÍSTICO: UNA REVISIÓN<sup>1</sup>**

Alejandra Toro Castillo<sup>2</sup>, Yessica Alejandra Alonso Montoya<sup>3</sup>

### **Resumen:**

El presente documento expone una revisión de la literatura de las diferentes alternativas existentes en la actualidad relacionada con la mitigación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por parte del transporte terrestre de carga utilizado en el área de logística. Se comienza con una breve descripción del significado y la importancia del transporte para la cadena de suministro, explicando las problemáticas ambientales y de salud que generan el transporte terrestre, uno de los más utilizados dentro de las ciudades para conectar las industrias con los clientes. Así mismo, se presenta una descripción de la normatividad utilizada a nivel mundial para medir la huella de carbono, seguidamente de los métodos que se han utilizado en la actualidad para abordar la reducción de CO<sub>2</sub> por parte de los vehículos utilizados para el transporte terrestre de carga y los resultados que se han obtenido a partir de estos. Finalmente, se presentan diferentes alternativas asociadas a las nuevas tecnologías que podrían ser implementadas a futuro para la mitigación de gases de efecto invernadero en vehículos de transporte terrestre como lo son el internet de las cosas (IoT), el uso de sensores ambientales, los biocombustibles, los vehículos eléctricos, entre otros.

**Palabras Clave:** Logística, logística verde, transporte verde, sostenibilidad y reducción de CO<sub>2</sub>.

---

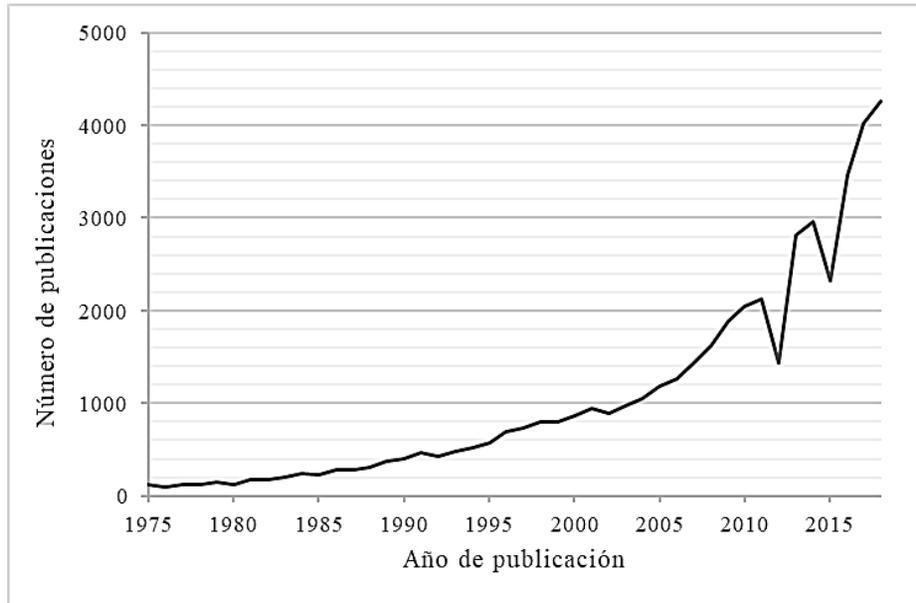
<sup>1</sup> Monografía Especialización en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Asesor Temático: Luis Gabriel Mantilla. Profesor Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia. Asesor Metodológico: Gloria Osorno. Profesora, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia.

<sup>2</sup> Especialista en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Ingeniera de Producción.

<sup>3</sup> Especialista en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Ingeniera de Materiales.

## **1. Introducción**

En la actualidad, problemáticas mundiales como el cambio climático y el calentamiento global continúan siendo temáticas de gran interés a nivel mundial debido a su gran incidencia en elementos importantes para la vida humana, como lo son la naturaleza, el agua y especialmente el aire. El cambio climático se asocia principalmente al incremento de la temperatura media del planeta, esto ligado al uso de combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo, que emiten gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este gas se acumula en la atmósfera, acumulando la energía proveniente de la radiación solar y con ello incrementado la temperatura media del planeta, además de generar problemas de salud [1]. En el 2018, las emisiones de  $\text{CO}_2$  a nivel mundial registraron un alza de 2,7% respecto al año 2017. Además, en el 2016 ya había existido un alza de 1,6% después de tres años con un porcentaje estable [2]. Este incremento se deriva de actividades humanas como la agricultura y la industrialización. De esta última, es bien conocido que, para el área de logística de las compañías, el correcto funcionamiento de la cadena de suministro es un elemento clave que se basa en los sistemas de transporte encargados de movilizar las materias primas o el producto finalizado entre diferentes lugares, todo con el fin de lograr las exigencias requeridas por los clientes [3]. Sin embargo, la predominancia del transporte terrestre de carga basado en el uso de motores de combustión interna, donde predomina en mayor medida el diésel y luego la gasolina, contribuye en gran medida al incremento del contenido de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. Por tal razón, desde la ingeniería se han aplicado algunas estrategias para la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$ , estrategias que involucran el recambio de tecnologías, uso de nuevos combustibles, o en el caso de la logística, el diseño eficiente de rutas que contemplan un menor tiempo y/o distancia de desplazamiento con el objetivo de reducir el consumo de combustible [4] [5]. El transporte verde surge como un concepto para ayudar a la sostenibilidad de todos los sistemas de transporte, y dentro de este concepto se investigan nuevas opciones, diferentes a las tradicionales, para que las operaciones logísticas como el transporte terrestre de carga tengan un menor impacto en el medio ambiente así como en la salud humana [6]. Temas como estos, relacionados con la reducción del  $\text{CO}_2$  emitidos a la atmósfera, han sido de gran interés a nivel mundial, lo cual se evidencia en el incremento de investigación desde las diferentes áreas del conocimiento que exploran estrategias para la mitigación en la generación y emisión de este gas de efecto invernadero, tal como se aprecia en la Figura 1.



**Figura 1.** Publicaciones relacionadas con la reducción de CO<sub>2</sub>.

**Fuente:** Scopus [7]

El propósito de este artículo es realizar una revisión literaria de los estudios que se han llevado a cabo acerca de la mitigación del CO<sub>2</sub> asociado al transporte terrestre de carga. En los estudios consultados se identificaron las principales variables, asociadas con el transporte terrestre de carga, que contribuyen a la generación de CO<sub>2</sub>, además de los métodos de solución que se han empleado hasta la fecha, el objetivo de la investigación, así como las tecnologías empleadas para cumplir este objetivo. Este análisis se realizó con base en los artículos de revistas y libros que muestran los últimos 10 años de investigación en esta área. La búsqueda bibliográfica se efectuó en bases de datos como Ebsco, ScienceDirect, Scielo, y Scopus usando palabras claves como: “Huella de carbono”, “minimización del CO<sub>2</sub> en transporte”, “logistics”, “Green transportation”, entre otras.

El presente documento se divide en 6 secciones. En la segunda sección se presenta la descripción de los diferentes medios de transporte terrestre de carga utilizados en logística que generan CO<sub>2</sub>. Así mismo, se determinaron las etapas del proceso que presenta el transporte terrestre de carga en el área de logística. En la tercera sección se discuten los efectos negativos de CO<sub>2</sub> sobre el ambiente y la salud humana. En la cuarta sección se presentan las metodologías, los métodos, modelos y resultados planteados desde la literatura para procurar una solución a esta problemática.

Consecuentemente, en la quinta sección se contempla el uso de las nuevas tecnologías. Para finalizar, en la última sección, se presentan las conclusiones generales, además de algunas sugerencias para trabajos que se realicen en el futuro.

## **2. Transporte terrestre logístico y emisiones de CO<sub>2</sub>**

El proceso de gestión logística es parte fundamental de las industrias, debido a que este incide en todas las áreas de la compañía ya que está encargado de optimizar los procesos de producción y distribución existentes. Para que esto se dé, un elemento primordial en el área de logística es el transporte, debido a que permite que todos los procesos de la compañía funcionen a cabalidad, conectando los diferentes partes de la cadena de suministro como lo son los proveedores, la empresa y finalmente el cliente. El transporte es de vital importancia para el desempeño exitoso de cualquier compañía, ya que este representa un tercio de los costos logísticos e incide en sobremanera en el rendimiento que posee todo el sistema logístico. Por tal razón, el transporte está interrelacionado con todos los procesos de la cadena de suministro, desde el abastecimiento de las materias primas, hasta el transporte del producto terminado [3] [8]. El principal medio de transporte utilizado en la logística es el terrestre, como camiones y tracto mulas, ya que están en consonancia con las dinámicas industriales que se llevan al interior de las ciudades y los grandes asentamientos urbanos, convirtiéndolo en la alternativa más barata y accesible del mercado para dichas dinámicas. La eficacia del transporte terrestre en logística depende de variables internas y externas al área de logística. Dentro de las variables internas se considera la ubicación de las plantas de producción y de los centros de distribución, además, del producto que se transporta y las características que poseen los vehículos usados en su transporte. Dentro de las variables externas, se encuentran la infraestructura de las vías, la organización logística que poseen los clientes, inconvenientes de orden público, entre otras. Para la optimización de los procesos de transporte se trazan rutas que sean más eficaces en las entregas, así como en la disminución del número de viajes y de vehículos utilizados, lo cual impacta directamente en el consumo de combustible [9] [10]. Sin embargo, este tipo de transporte logístico conlleva a serios problemas ambientales, como lo es la gran cantidad de CO<sub>2</sub> que emiten a la atmósfera, entre un 30 y 80% de estas emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles,

incrementando drásticamente la huella de carbono asociada a la industria [11]. Debido a esto, se ha generado un nuevo discurso enfocado a que las políticas internas de la industria y sus procesos de mejora continua estén acompañadas de esfuerzos dirigidos a ser de ésta más sostenible en toda su cadena productiva, reduciendo así su huella de carbono [12]. Es aquí donde nace la logística verde, basada principalmente en mejorar desde la logística aspectos económicos asociados con las materias primas, el almacenamiento, los procesos y el transporte, que a su vez redundan en una reducción del impacto ambiental que éstas actividades industriales tienen en el entorno, generando un desarrollo sostenible desde todos los ámbitos [13]. El término transporte verde se deriva de la logística verde, y consiste en generar un servicio de transporte que posea un impacto menor en la salud humana y en el medio ambiente, es decir, que tengan una menor emisiones de gases de efecto invernadero, comparado con otros servicios de transporte que realizan la misma labor [6].

Por lo anterior, es de gran importancia hacer una adecuada gestión del transporte para que exista una transformación sostenible para el transporte verde, con el fin de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte del sistema de transporte más utilizado que es el terrestre, aumentando la eficiencia de esta área, así como la competitividad de la empresa.

### **3. Problemáticas relacionadas con la emisión de CO<sub>2</sub>**

En el siguiente apartado se desarrollará cómo la generación de CO<sub>2</sub> a partir del transporte terrestre crea problemas ambientales, como el cambio climático, la lluvia ácida, la reducción de la biodiversidad, entre otros. Además, de acarrear problemas de salud desde enfermedades respiratorias hasta problemas cardiacos.

#### **3.1 Problemas ambientales**

La crisis ambiental que se vive en la actualidad se deriva del modelo productivo actual en la industria, que es en gran medida contaminante e insostenible. Éste está relacionado con múltiples factores interrelacionados, como lo es el incremento de la población y el crecimiento económico incontrolado asociado a la mayor demanda de bienes y servicios por dicha población en crecimiento, lo cual ha generado grandes problemáticas globales como el

cambio climático, la lluvia ácida, la reducción de la biodiversidad, la deforestación, entre otras. Estos problemas son generados principalmente por el uso de energía a partir de combustibles fósiles [14]. El uso de los combustibles fósiles en el modelo productivo deriva en problemas de calidad del aire, como lo son el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero y de material particulado en el aire, además de gases como el dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno, al igual que gases nitrosos encargados de generar lluvias ácidas. Otro fuerte impacto del uso de combustibles fósiles en el ambiente, es sobre los recursos hídricos. La quema de combustibles fósiles conlleva a un incremento en la temperatura y contaminación de fuentes acuíferas por productos secundarios generados tras la combustión, generando una reducción en los niveles de oxígeno y cambios en el pH, respectivamente.

El transporte utiliza principalmente combustibles fósiles, y es uno de los principales responsables de los problemas ambientales, ya que emite alrededor del 20% de los gases de invernadero como el CO<sub>2</sub>, en la Tabla 1 se muestra los impactos más significativos generador por el transporte terrestre en el aire, agua, suelo y los ecosistemas [15].

**Tabla 1.** Impactos significativos del transporte terrestre.

	<i>AIRE</i>	<i>AGUA</i>	<i>SUELO</i>	<i>ECOSISTEMAS</i>
<b>TRANSPORTE TERRESTRE</b>	Emisiones de gases de efecto invernadero como CO <sub>2</sub> .	Contaminación de ríos de aguas subterráneas por lavado de carreteras.  Acidificación de lagos.  Modificación de cursos de agua por infraestructuras.	Pérdida de suelo por infraestructuras .  Vertedero de coches y derivados del uso.	Infraestructuras: degradación del medio, fragmentación de habitats, muerte por atropello de animales, entre otros.

**Fuente:** C. Bordehore, PROBLEMAS AMBIENTALES, PROBLEMAS HUMANOS, Grupo Editorial Universitario, 2005 [15].

La acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera genera un incremento en la temperatura de la superficie de la tierra, debido a que impide el enfriamiento normal de la tierra por la absorción de radiación que la tierra genera y que escapan por medio de la capa de ozono al espacio. Así que el calor que sale de la tierra es menor y se acumula en la superficie, por tal razón generando una mayor temperatura, este es un proceso natural que ocurre en la tierra, sin embargo, gracias a la industrialización, este porcentaje de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha aumentado abruptamente en los últimos 100 años. Este hecho causa el derretimiento de los polos, contribuyendo al crecimiento del nivel de mar, cambios en el clima, además de afectar la vegetación [16].

### **3.2 Problemas de salud**

El futuro de la civilización humana está ligado fuertemente al desarrollo del medio ambiente. Con problemas como el cambio climático derivado de la misma actividad humana, las personas están presentando problemas de salud [17]. Partes de estos son gracias a las grandes concentraciones de CO<sub>2</sub>, el cual es un gas incoloro e inoloro que, al estar presente en el aire, entra al cuerpo humano mediante las vías respiratorias. Al ingresar el dióxido de carbono a las vías respiratorias, causa enfermedades respiratorias, como asma, disnea, dificultad para respirar, entre otras. Cuando el dióxido de carbono llega hasta la parte más pequeña de los pulmones, los alvéolos, pasa a la sangre, acarreando leves problemas como vómito, confusión, desorientación, y hasta llegar problemas graves como los problemas cardíacos, incluyendo hipertensión, alta presión arterial e inclusive infartos, que pueden provocar la muerte de las personas [18].

### **4. Alternativas para la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte terrestre.**

En el siguiente apartado se mostrará algunas de las diferentes alternativas para la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte terrestre, partiendo desde la normatividad existente en la actualidad a nivel mundial relacionada con la medición de la huella de carbono, pasando por algunos métodos utilizados en el transporte por el área de logística para mitigar la emisión de CO<sub>2</sub> y finalizando con el uso de la tecnología que está en proceso de desarrollo para la disminución de este mismo gas en el transporte terrestre.

#### 4.1 Normatividad para la medición de la huella de carbono

La huella de carbono es la medida de la totalidad de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> que se produce alrededor del desarrollo de un producto, a lo largo de toda la cadena de producción, desde la extracción de materias primas para la obtención de un producto hasta el tratamiento de los residuos que este produce, involucrando el proceso de manufactura y el transporte en la cadena de suministro. En resumen, la huella de carbono es el impacto que generan las actividades humanas que afectan el medio ambiente. Y es por tal motivo, que es de gran importancia cuantificar la huella de carbono, debido a que es la medición que permite identificar el efecto que tiene en el medio ambiente cualquier proceso humano, por tal razón a nivel mundial se han creado pactos, tratados y normas, como se muestra en la Tabla 2, para medir y controlar la emisión de gases de efecto invernadero [19].

Una de las metodologías más utilizadas para conocer la huella de carbono se da mediante la medición de CO<sub>2</sub> equivalentes a la relación del consumo directo e indirecto de una empresa que fabrica un producto, respecto a los materiales y energía utilizados para contar con un inventario de estas emisiones. Para ello las emisiones se miden de tres maneras, las fuentes directas, es decir las que están relacionadas con la empresa como equipos vehículos propios. Las fuentes indirectas, son las que están relacionadas con la empresa que abastecen a estas mismas. Las últimas son las fuentes indirectas que no pertenecen a la empresa, y que son derivadas de otras actividades, como el transporte tercerizado [20].

**Tabla 2.** Algunas normatividades alrededor al mundo respecto a la medición de la huella de carbono.

<i>NOMBRE</i>	<i>DEFINICIÓN</i>	<i>REFERENCIA</i>
Protocolo de Kioto	Fue el primer protocolo internacional creado en el año 1998, en la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y su objetivo es reducir en un 5,2% las emisiones gases de efecto invernadero alrededor del mundo con relación a los años 90s.	[21]

---

Green House Gas (GHG) Protocol	Protocolo internacional empleado para la medición de gases de efecto invernadero en cualquier sector productivo, además de las emisiones generadas por fuentes indirectas a este, como el transporte. Este protocolo proporciona orientación a las empresas, además de los requisitos que deben crear para estar acorde al protocolo.	[22], [23]
Normal PAS 2050 -2060	Norma creada en Inglaterra por la British Standards Institution con el fin de verificar la huella de carbono desde diferentes ámbitos. La aplicación de esta norma es voluntaria por parte de las empresas, y estas deben garantizar un análisis de ciclo de vida de sus productos a profundidad. Estos ciclos de vida son vistos desde dos aspectos, el primero cuando la vida del producto acaba cuando se entrega a una empresa para ser empleado en la elaboración de otro producto. El segundo, es cuando el producto completa su ciclo de vida hasta llegar al cliente.	[24], [23]
Normas ISO 14064 14067- 14069	Norma a nivel internacional que calcula la huella de carbono en productos de aspecto comercial. Uno de sus componentes es la cuantificación e identificación de productos mediante el etiquetado de la huella de carbono. Otro de sus componentes estipula como deben ser declaradas los documentos públicos acerca de la huella de carbono para que sean verificables.	[13], [25]
Carbon Disclosure Project (CDP)	Es un proyecto que permite medir la huella de carbono de las organizaciones y divulgarla globalmente para que los inversores, empresas y ciudades puedan gestionar de manera eficaz el impacto que se genera en el medio ambiente.	[26], [27]
Carbon Trust Standard	Certificación a nivel global de empresas con el fin de lograr mejores prácticas en la medición y gestión de las emisiones de CO <sub>2</sub> .	[28]

---

**Fuente:** Propia.

Existen otras normativas internacionales como: Product Environmental Footprint (PEF), Norma BPX 30- 323 en Francia, Carbon Inex Casino en Francia, Climate Certification System en Suiza, entre otras muchas más. Sin embargo, no existe una medida estándar global unificada que permita cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero de una misma manera y es por tal razón que el acogimiento de nuevas prácticas limita el avance de una economía sostenible [29].

#### **4.2 Métodos para la eficiencia y reducción de CO<sub>2</sub> con el sistema de transporte logístico**

La reducción de la huella de carbono y de las emisiones de CO<sub>2</sub> se ha vuelto crítica para las empresas, ya que en algunos países se exige cumplir con cierta normatividad que tenga un impacto positivo con el medio ambiente, y de no ser así, esto podría generar multas ambientales con altos costos. Con tal motivo, se han buscado estrategias y métodos para mejorar la eficiencia y la mitigación del CO<sub>2</sub> por parte del sistema de transporte terrestre de carga, ya que en el área de logística este es uno de los que más aportan a estas emisiones. Principalmente, estos modelos se basan en el mejoramiento del ruteo de camiones para disminuir el consumo de combustible y así generar menos gases de efecto invernadero.

Una manera de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el transporte es creando modelos cuantitativos y cualitativos de gestión de este mismo. Los modelos cualitativos buscan construir una caracterización del transporte de la cadena logística desde diferentes ramas, fijando objetivos, al igual que caracterizando todo el proceso de transporte terrestre a lo largo de la cadena de suministro. En algunos casos, modelan escenarios estratégicos, tácticos y operacionales, como se muestra en la referencia [30], guiados a la elección de proveedores con un enfoque verde, al igual que en todas las operaciones del proceso productivo, incluyendo el transporte.

Dentro de las estrategias cuantitativas se encuentran los algoritmos metaheurísticos, los cuales consisten en modelos matemáticos que permite solucionar los problemas de ruteo relacionado con el transporte terrestre. De igual manera, se utilizan estrategias con apoyo de tecnologías de la información y comunicación (TIC). Los autores [31] [32] [33] [34] [35] utilizaron los métodos descritos anteriormente, obteniendo mediante los algoritmos metaheurísticos la disminución de los tiempos promedios de las rutas respecto a las rutas

que se tenían implementadas, decreciendo así las emisiones de las empresas donde se implementaron los modelos. Esto mismo se evidenció con la integración de tecnologías de la información y comunicación.

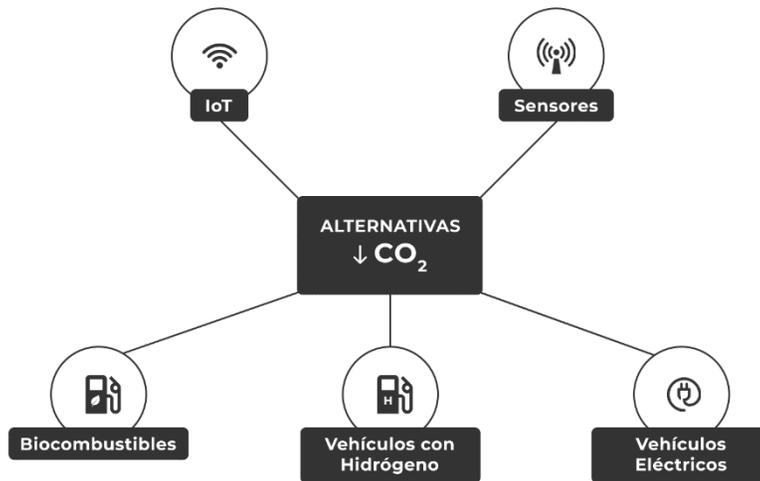
Otro modelo matemático utilizado es el Pollution Routing Problem (PRP) en el cual se crean las rutas, interconectadas por nodos, que corresponderán a un grupo de clientes, determinando la velocidad de cada tramo. Una modificación de este método es el Bi-objective Pollution Routing Problem, en el cual un grupo de vehículos, satisface la demanda de todos los clientes, retornando al depósito sin cargar más de su capacidad, además, a los clientes se les entrega dentro de una ventana de tiempo. Este sistema tiene por objetivos medir el consumo de combustible y el tiempo total de conducción [36]. Existen variaciones de este modelo como el Efficient Pollution Routing Problem (EPRP), que integra nuevos nodos, y además de variables como costos [37].

AbaniCO<sub>2</sub>, es un método que combina la parte numérica con la cualitativa. Este método permite organizar los diferentes enfoques internacionales que se le ha dado a la medición de la huella de carbono, haciendo más entendible el proceso de toma de decisiones ligado a esta medición de carbono. El método se organiza en tres componentes de fácil entendimiento acerca del marco conceptual de la huella de carbono, y el análisis que se debe realizar para adoptar un proceso nuevo que sea guiado hacia el cuidado del medio ambiente. El nombre de este método se debe a que se unifican en una sola opción las diversas metodologías que se encuentran disponibles para medir la huella de carbono. Este método está conformado por seis etapas, la primera consiste en definir el objetivo del cálculo, relacionado con las razones del porqué las empresas desean determinar la huella de carbono y la última etapa consiste en la aplicación de un software para disminuir este tipo de emisiones. Como resultado, esta metodología permite tomar decisiones gerenciales más efectivas, guiadas al camino de la sostenibilidad de una empresa. [38]

#### **4.3 La tecnología en la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte.**

El desarrollo tecnológico actual ha sido de gran importancia a la hora de solucionar diferentes problemáticas a nivel mundial, como es la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, en la Figura 2 se muestran algunas de las diferentes alternativas a futuro para reducir la emisión de

este gas en el transporte y que serán explicadas a lo largo de tema. Gracias a los avances científicos y tecnológicos, en la actualidad se puede hablar de conceptos como internet de las cosas (IoT), el cual se refiere a lograr interconectar todos los objetos utilizados en el día a día con la nube con el fin de que estos objetos de la cotidianidad se comuniquen e intercambien datos en tiempo real. El IoT tiene muchos campos de aplicación cómo las ciudades inteligentes, elementos del hogar, el medio ambiente, la logística, la industria y el transporte. En este último, existe un concepto derivado llamado el internet de los vehículos (IoV), el cual consiste en lograr conectar los diferentes vehículos existentes para el transporte de personas y de carga con la nube para crear sistemas inteligentes, en el que exista actualización constante del estado de los vehículos, el cuidado del medio ambiente, el ahorro de energía, la seguridad, entre otros. Con la implementación de estas tecnologías se lograría reducir el tráfico, el consumo de gasolina, evadir accidentes, y convertir el hecho de conducir más seguro, como para los conductores, como pasajeros o para la carga [39] [40].



**Figura 2.** Alternativas futuras para la reducción del CO<sub>2</sub>.

**Fuente:** Propia

Un ejemplo del uso de nuevas tecnologías aplicadas a procedimientos que se utilizaban en el pasado es el cálculo eficaz de rutas. Antes este procedimiento se hacía de manera manual, en la actualidad en internet se encuentra herramientas disponibles de manera gratuita como ActiRuta, RoutinReparto, RoutingMaps. Este tipo de elementos online permiten optimizar las rutas mediante el uso de algoritmos que simulan el mejor escenario para las rutas de un vehículo, empleando datos

particulares de estas, como lo son los tipos de camiones utilizados, la capacidad y tamaños de estos mismos, al igual que la localización de las diferentes locaciones existentes. Este tipo de tecnología ya existente, se puede integrar con el uso de dispositivos con sistema de posicionamiento global, o GPS como lo indican sus siglas en inglés, conectados a internet en los vehículos transportadores, todo con el fin de obtener datos en tiempo real y lograr de manera eficaz, si es necesario, un recalcado de trayectorias dependiendo de las circunstancias que se presenten [41].

Otra idea del IoT para mitigar los problemas ambientales relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero es el uso de dispositivos que permitan censar y controlar las condiciones ambientales. Dentro de estos dispositivos se encuentran sensores que se pueden disponer de dos maneras, en nodos que se encuentren en la trayectoria, o dentro de los vehículos. Existen sensores electroquímicos, que miden las concentraciones de gases como oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógenos, sulfuro de hidrogeno, entre otros, y sensores de infrarrojo que simplemente detectan los gases presentes. Estos sensores se pueden disponer en el escape de los vehículos, ser conectados a un controlador que pueda al mismo tiempo, conectarse mediante el IoT a la nube, y llegar hasta los celulares inteligentes, mostrando en tiempo real la cantidad de gases que se están generando [42]. Sin embargo, aún no se ha implementado a gran escala este tipo de tecnologías, debido a que aún siguen en investigación en automóviles, además estos dispositivos poseen un alto costo, y en ciertos casos la medición de los gases se puede alterar fácilmente por otros contaminantes en el ambiente. Así mismo, la integración total de estos sistemas es uno de los desafíos más grandes, ya que pueden existir inconsistencias que no permiten la interconexión como el procesamiento de los datos obtenidos [43] [44].

De igual manera, nuevas tecnologías y estrategias en la automoción y combustible están surgiendo paralelamente al uso del IoT. El desarrollo de nuevos combustibles es una de ellas, ya que se continúa investigando combustibles que disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero, como por ejemplo el uso de biocombustibles, electricidad, hidrogeno entre otros. Sin embargo, algunas de estas nuevas tecnologías solo han sido investigadas para vehículos pequeños, no obstante, cuando estén completamente consolidadas podrían escalarse al transporte de carga terrestre.

Los biocombustibles son combustibles que son renovables al provenir de fuentes renovables como plantas y/o animales. En la actualidad, los combustibles más utilizados vienen de plantas como la

caña de azúcar, el trigo, maíz, entre otros. Entre los biocombustibles más conocidos se encuentran el biodiesel, el bioetanol, biometanol, biobutanol, y el biogás. Estos tipos de combustibles generan dióxido de carbono sin emisiones netas de carbono, ya que cuando se libera dióxido de carbono es absorbido por la misma fuente que es la base de los biocombustibles, es decir las plantas, manteniendo el balance del proceso [45] [46].

Los vehículos eléctricos, son otra alternativa para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Existen tres tipos de vehículos eléctricos: los vehículos completamente eléctricos, los vehículos eléctricos que poseen batería de combustible, y los híbridos que son una combinación de los dos anteriores. Estos últimos vehículos poseen un motor de combustión interna a diferencia de los dos anteriores que son impulsados solamente por energía eléctrica [47]. Este tipo de tecnologías puede ser utilizada desde carros personales hasta camiones de gran capacidad. Según estudios, un camión que transita entre 25 y 30 mil kilómetros al año produce alrededor de 13 toneladas de CO<sub>2</sub> consumiendo \$ 12 millones en combustible, en cambio, un camión eléctrico puede consumir 11.300 kilovatios de electricidad sin producir contaminación por un valor de \$ 5 millones. Sin embargo, estos tipos de vehículos aún siguen en prueba, por varios factores, dentro los que se encuentra la investigación en baterías para el almacenamiento de energía eléctrica, consumo eléctrico, costos, entre otros [48].

Otra clase de vehículos que ayudan a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> son los que usan hidrogeno como combustible ya que lo queman directamente en el motor o lo transforman en electricidad mediante una celda de combustible. Estos vehículos poseen tanques de hidrogeno que se mezclan con oxígeno para generar la propulsión el vehículo. Estos coches generan vapor de agua que es descartado por el tubo de escape. A pesar de las ventajas que posee este tipo de vehículo, aún sigue en estado de investigación, por los altos costos necesarios para los materiales de las celdas, además de que la producción de hidrogeno aislado es costosa. De igual manera, si existiese una fuga en el vehículo podría generar una explosión ya que el hidrogeno es inflamable, lo cual acarrea problemas de seguridad para sus usuarios [49] [50].

## **5. Conclusiones**

La evidencia presentada en este artículo de revisión muestra la gran importancia del transporte terrestre dentro de la cadena de suministro, al mismo tiempo que se evidencia el aporte de las emisiones CO<sub>2</sub>, por parte de este mismo, al medio ambiente. Estas emisiones de CO<sub>2</sub> causan problemas ambientales, como el calentamiento global, tanto como problemas de salud a la población, como enfermedades respiratorias. Con el fin de mitigar la huella de carbono de las empresas, se evidenció el amplio portafolio de normas que existen a nivel mundial que permiten medir la huella de carbono relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, estas normatividades no son muy aplicadas por la falta de unificación en un solo estándar. De igual manera, se mostró que, en la actualidad, la manera más utilizada para que las empresas disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte terrestre de carga, es mediante el diseño de rutas por modelos cuantitativos, al igual que existen algunas metodologías que intentan unificar algunas normativas internacionales para ser permitirse evaluar la huella de carbono generada por las empresas. El futuro para el transporte terrestre de carga en logística, consiste en crear vehículos interconectados a la nube a través del internet de las cosas (IoT), acoplados con sensores que notifiquen en tiempo real la emisión de gases, al igual que el cambio de combustible para estos vehículos por biocombustible, hidrogeno o electricidad.

## **6. Referencias**

- [1] MinAmbiente, «Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Colombiano,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico>. [Último acceso: 06 04 2019].
- [2] E. Y. AFP, «El tiempo,» 05 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/emisiones-de-co2-en-el-2018-alcanzaron-un-nivel-record-301906>. [Último acceso: 02 04 2019].
- [3] M. Christopher, Logistics and supply chain management, Pearson UK, 2013.
- [4] K. Lin Canhong, «Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends,» *Expert system with applications*, vol. 41, pp. 1118-1138, 2014.

- [5] MATOS, Marcos Raylan Sousa; FROTA, Yuri; OCHI, Luiz Satoru., «Green Vehicle Routing and Scheduling Problem with Split Delivery.,» *Clean production*, vol. 69, pp. 13-20, 2018.
- [6] H. S. a. R. R. Khodakaram Salimifard, «Green Transportation and the Role of Operation Research,» de *International Conference on Traffic and Transportation Engineering*, Press, Singapore, 2012.
- [7] SCOPUS, «CO2 reduction,» [En línea]. Available: [www.scopus.com](http://www.scopus.com). [Último acceso: 02 04 2019].
- [8] W. L. Y. a. M. A. P. T. Yung-yu TSENG, «THE ROLE OF TRANSPORTATION IN LOGISTICS CHAIN,» *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 5, pp. 1657 - 1672, 2005.
- [9] A. Mercado, «Logística MX,» 15 04 2015. [En línea]. Available: <http://www.logisticamx.enfasis.com/articulos/72105-indicadores-transporte-un-mejor-crecimiento->. [Último acceso: 05 04 2019].
- [10] W. Marin, «Logística eficiente para el manejo de la carga, un aporte a la sociedad y a la empresa,» *Ingeniería y Sociedad*, pp. 27-33, 2014.
- [11] G. P. D. & B. D. Ćirović, «Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neurofuzzy model.,» *Expert Systems with Applications*, vol. 41, p. 4245–4258, 2014.
- [12] U. & B. M. Martinsen, «Matches and gaps in the green logistics market,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 42, pp. 562-583, 2012.
- [13] J. C. & A. Q. Y. J. Nava Chacin, «Logística Verde y Economía Circular,» *International Journal of Good Conscience*, vol. 10, pp. 80-91, 2015.
- [14] S. R. A. L. Antonio Aledo, «PROBLEMAS SOCIOAMBIENTALES I: TECNOLOGÍA, POBLACIÓN Y MEDIO AMBIENTE,» *Research Gate*, 2015.
- [15] C. Bordehore, PROBLEMAS AMBIENTALES, PROBLEMAS HUMANOS., Grupo Editorial Universitario, 2005.
- [16] A. G. Arias, «El medio ambiente y los problemas ambientales co2, lluvia ácida, capa de ozono, pesticidas.,» [En línea]. Available:

- <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Energia/Energia14/HTML/articulo10.htm>. [Último acceso: 10 04 2019].
- [17] J. N. Sainz, «CAMBIO CLIMÁTICO Y PROTOCOLO DE KIOTO: EFECTOS SOBRE EL EMPLEO, LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE,» de *Protocolo de Kioto*, Kioto, 2005.
- [18] S. A. Rice, «HEALTH EFFECTS OF ACUTE AND PROLONGED CO2 EXPOSURE,» de *Conference of Carbon Sequestration*, Alexandría, Virginia, USA, 2003.
- [19] J. C. & A. Q. Y. J. Nava Chacin, «Logística Verde y Economía Circular,» *Daena: International Journal of Good Conscience.*, vol. 10, nº 3, pp. 80-91, 2015.
- [20] R. A. N. P. Julia Núñez Monroy, «Huella de Carbono: más allá de un instrumento de medición. Necesidad de conocer su impacto verdadero.,» de *IV Congreso Internacional Latina de Comunicación Social – IV CILCS - Universidad la Laguna*, Queretano, Mexico, 2012.
- [21] N. Unidas, «PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL,» Kioto, 2018.
- [22] «Green House Gas (GHG) Protocol,» [En línea]. Available: <http://ghgprotocol.org/>. [Último acceso: 15 04 2019].
- [23] R. E. M. Blas, «Huella de Carbono en el Alcance 1 y 2, utilizando la metodología del GreenHouse Gas Protocol (GHG Protocol) y la Norma ISO 14064-1:2006, en el Centro de Producción “Productos Unión”,» *UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA*, 2018.
- [24] A. E. d. Calidad, «AEC,» [En línea]. Available: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2050>. [Último acceso: 15 04 2019].
- [25] L. M. ORTIZ, «NORMAS ISO 14000 COMO INSTRUMENTO DE GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL,» Universidad Veracruziana, Veracruz, México, 2009.
- [26] D. S. N. J. J. O. Daniel C. Matisoff, «Convergence in Environmental Reporting: Assessing the Carbon,» *Business Strategy and the Environment*, vol. 5, nº 22, p. 285–305, 2013.
- [27] «CDP,» [En línea]. Available: <https://www.cdp.net/es>. [Último acceso: 15 04 2019].
- [28] «Carbon Trust Standard,» [En línea]. Available: <https://www.carbontrust.com/home/>. [Último acceso: 15 04 2019].

- [29] J. L. Doménech, «LA HUELLA DE CARBONO: CONCEPTO, UTILIDAD Y APLICACIÓN,» Zaragoza, 2011.
- [30] G. V. S. R. LILIAN NATALY IVONNE ROZO MORA, «PROPUESTA DE UN MODELO DE GESTIÓN VERDE PARA LA MEJORA DE LA CADENA DE SUMINISTRO EN LA EMPRESA SIGHINOLFI GROUP.,» Universidad de La Salle , Bogotá, Colombia, 2016.
- [31] A. A. C. E. J. D. H. V. Rodrigo Andrés Gómez Montoya, «Transporte verde: eficiencia y reducción de CO2 integrando gestión, tecnologías de información y comunicaciones (TIC) y un metaheurístico,» *Producción + Limpia* , vol. 10, n° 2, pp. 53-68, 2015.
- [32] A. A. C. E. J. D. H. V. Rodrigo Andrés Gómez Montoya, «Modelo de centro de distribución verde: amigabilidad con el medio ambiente y eficiencia operacional usando un enfoque de procesos y un metaheurístico de búsqueda tabú,» *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 16, n° 31, pp. 199-217 , 2016 .
- [33] H. Min, «Application of a decision support system to strategic warehousing decisions,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 39, n° 4, pp. 270-281, 2009.
- [34] C. K. M. L. H. K. C. K. L. C. a. Z. W. S. Zhang, «Swarm intelligence applied in green logistics: A literature review,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 37, pp. 154-169, 2015.
- [35] S. A. T. a. J. R. M. S. Pishvaei, «“Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62, n° 2, pp. 624-632, 2012.
- [36] E. B. T. L. Demir, «The bi-objective Pollution-Routing,» *European Journal of Operational Research*, p. 464–478, 2014.
- [37] J. R. V. RUIZ, «PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN LAS RUTAS DE TRANSPORTE TERRESTRE DE MERCANCÍAS,» Nuevo León, México, 2017.
- [38] J. O. V. César Espíndola, «AbaniCO2: Un Método Simple y Efectivo para la Toma de Decisiones sobre la Adopción de la Huella del Carbono en la Gestión Sustentable de Emisiones en las Empresas,» *Información Tecnológica*, vol. 27, n° 3, pp. 35 - 52, 2016 .

- [39] M. S. S. R. Y. Usha Devi, «IoT in Connected Vehicles: Challenges and Issues- A Review,» de *International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, 2016.
- [40] R. P. F. D. C. J. H. C. B. Soumya Kanti Datta, «Integrating Connected Vehicles in Internet of Things Ecosystems: Challenges and Solutions,» de *Communication Systems Department, EURECOM, Biot, France*, 2016.
- [41] Y. Z. W. T. E. C. Y. Y. Jingbo Shang, «Inferring Gas Consumption and Pollution Emissions of Vehicles throughout a City,» *Microsoft Research*, 2014.
- [42] A. G. Campos, *Diseño e implementación de un analizador de gases para automóviles, Costa Rica*, 2017.
- [43] A. P.-L. ., R. J. D. ., F. L.-P. ., F. J. G.-C. G. Varela, «An Integrated System for Urban Pollution Monitoring through a Public Transportation based Opportunistic Mobile Sensor Network,» de *IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, Rende (Cosenza), Italy, 2009.
- [44] S. z. a. J. C.-C. Juan Antonio Guerrero Ibáñez, «IntegrAtIon chAllenges of IntellIgent trAnsportAtIon systems wIth connected VehIcle, cloud computIng, And Internet of thIngS technologIes,» de *IEEE Wireless Communications*, 2015.
- [45] M. S. D. M. A. V. Fernando Daniel Ramos, «Biocombustibles,» *Planta Piloto de Ingeniería Química*, vol. 25, n° 147, pp. 69-73, 2016.
- [46] B. A. T. Laboratory, «Beta Analytic Testing Laboratory,» [En línea]. Available: <https://www.betalabservices.com/espanol/biocombustibles/sobre-los-biocombustibles.html>. [Último acceso: 20 04 2019].
- [47] F. J. S. P. M. R. A. Joao A. Péc,as Lopes, «Integration of Electric Vehicles,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, n° 1, pp. 168-183, 2010.
- [48] Á. O. Arenas, «Con camiones eléctricos empresas moverán carga,» *El Colombiano*, 13 03 2019.
- [49] J. J. Mackenzie, *The keys to the car: Electric and hydrogen vehicles for the 21st century*, 1994.

- [50] T. E. L. Susan A. SHAHEEN, «EFFORTS TO REDUCE CO<sub>2</sub> IN THE TRANSPORTATION FIELD» IATSS RESEARCH Vol.31 No.1, 2007 REDUCING GREENHOUSE EMISSIONS AND FUEL CONSUMPTION – Sustainable Approaches for Surface Transportation –,» *IATSS RESEARCH*, vol. 31, n° 1, pp. 6-20, 2007.