

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**Análisis del impacto de emisiones y sustentabilidad por
sustitución de combustible en el sector del transporte público**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

ING. JORDAN IVÁN JOHNSON SANTANDER

DIRECTOR: DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ

SINODALES: DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

DR. JESÚS CEREZO ROMÁN

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN

DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO, 2021



Cuernavaca, Morelos, a 15 de enero de 2021

DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “Análisis del impacto de emisiones y sustentabilidad por sustitución de combustible en el sector del transporte público”, que presenta el alumno **Jordan Ivan Johnson Santander**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ		
DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA		
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN		
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN		
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ		

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

DSJ*MLGE/nmc.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha:2021-01-19 11:01:19 | Firmante

I3VUm6SugWCg0GznD5Bn1iH4gdR7TWxyM8C/1XRxsFy6JlNnS7YgpLoGB8dpoB5QE0GznBmLTaO6TeGAHFEDYBZxNuykJOZxNpqkPn5Aml6pH1YqCzYlitMmbI325QEA6D
OYZWkgRUKpQf974yuMPOROESbZmViWQwaP49sQeMxZKA YrixjHLDmH3tGHojnDlJcl8ltybox1A/dAYUsI9gg25mKFoe8nt2qjZDdLGwMGaYdxU3g87Ty8M8lhO4dJ0fLdVfdoF
cfiXL+UWj0BHetLQE SmsHU4Vbz94cjU2p15wlEsNcrTHQkMH1guNty6myEnxuC3untxrEliB3rv0w==

ANTONIO RODRIGUEZ MARTINEZ | Fecha:2021-01-19 11:02:27 | Firmante

yHFhSijjVZ5TQVuhVQke/zoLWOZuDUaQtbq1w4tcto5D67wK0+KX8jH6uYad79pSFuuArm+IRrO9EM2HLv1miSfYR74fm/MRDY3qZLNpJeeapwzGXZqrZIZ0guhuJALcXTRm4+
9To+Z65dd0qDwoE5au74Cbjj/OUPIT5GtX7DqyvM7rKleHq7Hlqvfn0kPWJYaEgARH4BmOhYcygBR27dX1xsEpP3Mxqb/QKH38Mj7v13QDCcRihcBHaCdKk9UHZmiX2uMDNQ
UunH9SUVsvr4/13HaxN2tzia4n2JoUCIKUOyNW0vb/E042KYMcbZektNKA82aVF8XBxPvyxw+Cw==

GABRIELA HERNANDEZ LUNA | Fecha:2021-01-19 13:05:23 | Firmante

HEzpSFhGWtzbcEFNseAbi1kKFsnI0fq+oBwWz75ZmBUZwl3qHzoVRf4cw9j8daOXv5HwgC4adjAtnNFS5c2JcVWppqVJhflrM+HNZQW84jMC7wonFcFctRDZu8yQFGnAEu7QD
Jp9Oav8HUr7wWeKVvaVwpqXZO8qFISEY54Qfb4kDIweO/N1eYs68vC0s9yH2A/AEiofBq1uLoa/r4gEifZz6SvIUBe4iGTCP/AZqQtg9D5T9yqUBtc9KjmVZdRXawxMK+Zv/q/6tkz
KROX5mm2QQ/Wf+IPzDKHDPh413sayof+zi2hOYkaEdBJBsMqxMhHPKSAqKTHdsI0hplvkpg==

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2021-02-02 13:56:14 | Firmante

ph4bOdSDGA5ZEwXy9VA3KvzwEgrL0CWk3VrWjHkPO1+X9OPI0nJjbmRB5B/sCGmmU74kjs2tBxRpsReg/WkGq8Yovi4lrRBV0V2ldhQNB2ib51M8uRNpD3q+J4LRazYDt2Cgq
S7vZXf+xazsIZDObn7oODjRMMCyRdkxei4y/mEcRjXjei3BymBd/rSlsKSFbWrfT0wby8MP9GajOwdDlfrUExvmfztzAFTxqAM5Fe/BNVsN81wcD3YPCYHI8tJG1lhhL/zKD0XXX6V
fx51KhTUSLftgzWTCCHKaw+gibpZUyO9moKbBLC6Y6Wc8lbomx432s/s5otEVca0ZT+Hg==

JESUS CEREZO ROMAN | Fecha:2021-04-26 08:38:31 | Firmante

Jxu9G8ILu+2TWe7rXZonibmizeneWUWM+swTmjV42S0l204VfdwysBJuhZfC14vcHLrEdTS0+XLPmMqI2Dme6M714XHrLKWDPdmfc4sHLYo/3hDOc1m/29Ocom4rB2/QVU8zo
O6C6NpHL6IWAfCNKjkq/ehg/TWqh0GBy+ULD9AN2zzd6sAv6ecHmGhqFhRErYbGgRaTP8MwPZHT65i26zcCYSaqqOo4fnHjG1d7p95oWAHhfyJ0rlgwZnml+xExfO76y9/wInn0
y6XCP1CzJAWllZu4Hg+k+bPMb4BhcJyZhc7wuo02pr7krMR/F8V+XSruys03m5HWRRef9FVwA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



uRUcpl

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/QraN2KRFMnnDbmoViSp5EeYjHycNOBid>



Resumen

La transición energética es un cambio que se está llevando a cabo en todo el mundo, migrando del uso de combustibles fósiles a energías renovables. El mayor demandante de derivados del petróleo en nuestro país es el sector transporte, alimentando el 99.81% de este sector. En la presente investigación se aborda un análisis de la sustentabilidad y el impacto ambiental por emisiones en el caso particular de sustituir la gasolina por gas natural

El Gas Natural Vehicular (GNV) ha demostrado ser un actor clave en el cambio hacia una economía baja en carbono y un sistema energético más sostenible que, a pesar que es de origen fósil, es un combustible más limpio, comparado con la gasolina y el diésel, aunado a esto, el ahorro en el costo de utilización economiza el 57% de los costos de operación a la fecha.

El sector transporte público sin itinerario fijo es por demás atractivo para someter a un cambio de combustible, ya que el parque vehicular sigue incrementando, 1091 unidades sólo de 2017 a 2018 y más importante aún, tienen un recorrido diario mayor comparado con el sector particular, además que, por cuestiones de legislación, éstas unidades no deben tener más de 10 años de antigüedad.

En México, ya existe vehículos operando con sistema dual fuel, siendo alimentados con GNV, como es el caso de Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Puebla, que han sido adquiridos con planes financieros atractivos para los concesionarios, lo que ha propiciado una reducción de las emisiones y un ahorro para los usuarios.

Abstract

The energy transition is a change that is taking place around the world, migrating from the use of fossil fuels to renewable energy. The largest applicant for petroleum derivatives in our country is the transportation sector, feeding 99.81% of this sector. This research addresses an analysis of sustainability and the environmental impact of emissions in the particular case of replacing gasoline with natural gas.

Vehicle Natural Gas (NGV) has proven to be a key player in the shift towards a low-carbon economy and a more sustainable energy system that, despite being of fossil origin, is a cleaner fuel, compared to gasoline and gasoline. Diesel, added to this, the savings in the cost of use saves 57% of the operating costs to date.

The public transport sector without a fixed itinerary is extremely attractive to undergo a fuel change, since the vehicle fleet continues to increase, 1091 units only from 2017 to 2018 and more importantly, they have a longer daily route compared to the private sector, furthermore, for legislative reasons, these units must not be more than 10 years old.

In Mexico, there are already vehicles operating with dual fuel system, being fed with NGV, as is the case of Mexico City, Monterrey, Guadalajara and Puebla, which have been acquired with attractive financial plans for dealers, which has led to a reduction emissions and savings for users.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento al CONACYT por el apoyo para la realización de este estudio de posgrado, así como a la UAEM por la infraestructura para cumplir con los objetivos en el tema propuesto del área de Sustentabilidad Energética.

Índice

Resumen	3
Abstract.....	4
Agradecimientos	5
Lista de tablas.....	10
Lista de figuras.....	11
Capítulo 1. Introducción	12
1.1. Introducción	12
1.2. Justificación	13
1.3. Planteamiento del problema	13
1.4. Hipótesis	14
1.5. Objetivo.....	14
1.5.1 Objetivo general	14
1.5.2 Objetivos específicos.....	14
Capítulo 2. Marco teórico.....	15
2.1. Antecedentes.....	15
2.1.1. Antecedentes de los vehículos de combustible.....	15
2.1.2. Antecedentes del GNV	16
2.1.3. Antecedentes históricos de emisiones	17
2.2. Características de los combustibles	18
2.3. Experiencias previas.....	20
2.3.1 El desarrollo del gas natural como combustible de automoción en China.....	20

2.3.2	Análisis de emisiones de CO ₂ para diferentes combustibles en la población de taxis en Pereira y Dosquebradas	21
2.3.3	Reducción de las emisiones de CO ₂ en vehículos de transporte: combustibles alternativos	21
2.3.4	Efectos ambientales de la electromovilidad en un transporte público urbano sostenible	22
2.3.5	Automóviles eléctricos con una mochila para clima pesado sobre la marcha	23
2.4.	Incidencia del transporte.....	25
2.4.1.	Incidencia en la sociedad	25
2.4.2.	Incidencia en la economía.....	26
2.4.3.	Incidencia en el ambiente.....	27
Capítulo 3.	Metodología.....	29
3.1.	Caracterización del parque vehicular.....	30
3.2.	Cuantificación de emisiones asociadas por sectores	31
3.3.	Evaluación de la sustentabilidad por sustitución.....	33
3.3.1.	Evaluación del impacto social	33
3.3.1.1.	Escenario uno	35
3.3.1.2.	Escenario dos	36
3.3.1.3.	Consultas asociadas.....	36
3.3.1.4.	Hospitalizaciones asociadas.....	38
3.3.1.5.	Muertes prematuras asociadas.....	38
3.3.1.6.	Reducción de impacto social	38
3.3.2.	Evaluación del impacto económico	39
3.3.2.1.	Impacto económico por gastos en salud.....	40

3.3.2.1.1.	Costos por consultas	40
3.3.2.1.2.	Costos hospitalarios	40
3.3.2.2.	Impacto económico por pérdida de productividad.....	40
3.3.2.2.1.	Pérdida de productividad por muertes prematuras	40
3.3.2.2.2.	Pérdida de productividad por ausentismo laboral	41
3.3.2.3.	Impacto económico por consumo de combustible	41
3.3.2.4.	Reducción de impacto económico	42
3.3.3.	Evaluación del impacto ambiental	42
3.3.3.1.	Escenario uno	42
3.3.3.2.	Escenario dos	43
3.3.4	Proyección de los impactos.....	44
Capítulo 4.	Resultados.....	45
4.1	Impacto social.....	45
4.1.1	Proyección del Impacto Social.	45
4.2	Impacto económico.....	50
4.2.1	Costos hospitalarios.....	50
4.2.2	Impacto económico por pérdida de productividad	50
4.2.2.2	Pérdida de productividad por ausentismo laboral	50
4.2.3	Impacto económico por consumo de combustible	51
4.2.4	Resultados del impacto económico	51
4.2.4	Proyección de impacto económico.....	52
5.	Impacto ambiental	54
Capítulo 5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	55
5.1	Conclusiones	55

5.2 Recomendaciones..... 56
Referencias..... 57

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de gasolina, GNV (Naturgy, 2020) (BP, 2020) (Repsol, 2016) (PEMEX, 2015)(Chen, Wang, & Zeng, 2019).....	20
Tabla 2. Inventario de emisiones por fuente para el estado de Morelos en Mg/año (SEMARNAT, 2014).....	32
Tabla 3. Estimadores IMCO con intervalo de confianza al 95% (IMCO, 2013)	35
Tabla 4. Estimadores de la literatura epidemiológica.....	37
Tabla 5. Resultados de impacto social	45
Tabla 6. Resultados de impacto económico	52
Tabla 7. Resultados de impacto ambiental	54

Lista de figuras

Figura 1. Emisiones de CO ₂ por sector, México 1990-2018 (IEA, 2019)	18
Figura 2. Emisiones resultantes de la compra y mantenimiento de autobuses diésel y eléctricos (Pietrzak & Pietrzak, 2020)	23
Figura 2. Emisiones de GEI de la vida de un automóvil (Kroher, 2019).....	24
Figura 3. Metodología propuesta. Elaboración propia	29
Figura 4. Inventario de emisiones por fuente para el estado de Morelos en porcentaje (SEMARNAT, 2014).....	33
Figura 5. Proyección de muertes prematuras del escenario 1.....	46
Figura 6. Proyección de hospitalizaciones del escenario 1.....	47
Figura 7. Proyección de consultas del escenario 1.....	47
Figura 8. Proyección de muertes prematuras (escenario dos)	48
Figura 9. Proyección de hospitalizaciones en escenario dos.....	49
Figura 10. Proyección de consultas en escenario dos.....	49
Figura 11. Proyección de impacto económico en escenario uno.	52
Figura 12. Proyección de impacto económico en escenario dos.	53
Figura 13. Proyección de impacto ambiental	54

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

El consumo energético del sector transporte proviene fundamentalmente de los combustibles fósiles y está asociado con los principales impactos negativos del transporte: cambio climático, contaminación atmosférica y problemas de salud. De hecho, en los años recientes la evidencia empírica ha abordado cada vez más las diversas consecuencias ambientales del consumo de gasolinas, en particular respecto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Esto ha conducido a desarrollar distintas estrategias y medidas a fin de reducir el nivel de emisiones de GEI (Reyes, Escalante, & Matas, 2010).

En el año 2019, el transporte reportó en México el 34.97% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Colocando a este sector como el mayor emisor de CO₂ del país, seguido por el sector producción de electricidad y calefacción con 34.53% (IEA, 2019). La necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y en particular de CO₂ ha llevado al sector transporte a la utilización de combustibles alternativos a la gasolina y el diésel.

Ahora, las circunstancias obligan a los transportistas a considerar otras opciones energéticas para desempeñar su oficio, no sólo por la defensa del medio ambiente y la salud, sino también para evitar las restricciones de circulación en la Zona Metropolitana del Valle de México que impone el programa Hoy no Circula (Arzate, 2016).

El presente trabajo se llevará a cabo en la zona metropolitana de Cuernavaca, lo que engloba a 8 municipios: Cuernavaca, Emiliano Zapata, Jiutepec, Temixco, Huitzilac, Tepoztlán, Xochitepec y Tlaltizapán de Zapata, con base a la NOM-EM-167-SEMARNAT-2017.

1.2. Justificación

El gas natural también es de origen fósil, sin embargo, es un combustible amigable con el ambiente, comparado con la gasolina y el diésel (Taboada Ibarra & Osnaya García, 2009). Este combustible permite un ahorro aproximado de 57% en cuanto a costos de utilización (Petrointelligence, 2020). Las ventajas en materia medioambiental permiten reducir 100% de los azufres, los óxidos sulfurosos y material particular, reduce en un 80% los óxidos nitrosos tan peligrosos y rebaja en más de un 25% las emisiones de CO₂ con respecto al equivalente de gasolina o diésel (Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015).

Por otra parte, estos combustibles serán suministrado por sistemas Dual-Fuel, el cual consiste en un sistema de inyección electrónica secuencial multipunto. Es un sistema de tecnología de quinta generación y permite el uso de combustible en estado líquido o gaseoso dando el mismo rendimiento y potencia en comparación a sólo usar combustible en estado líquido. Dicho sistema se puede adaptar a cualquier vehículo, de esta manera se podrán ocupar las mismas unidades que están circulando.

1.3. Planteamiento del problema

El mayor demandante de derivados del petróleo es el sector transporte; en México este sector es alimentado 99.81% por este combustible (gasolina) (IEA, 2018); los vehículos de pasajeros (taxis, autobuses y camiones) emiten 206 g de CO₂/km (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México), este factor asociado con el crecimiento descontrolado del parque vehicular; tiene como resultado una alta contaminación por parte de este sector.

A pesar de las medidas empleadas por el gobierno para reducir la cantidad de gases contaminantes emitidos a la atmósfera, los resultados obtenidos aún no son masificados, en gran medida debido al constante aumento en la cantidad de automóviles y que no contamos con una cultura de vialidad desarrollada.

Por lo cual un cambio de combustible es una propuesta para explorar ya que este sector no detendrá su crecimiento; con este cambio, sin la necesidad de introducir más vehículos al parque y teniendo un efecto económico atractivo para los usuarios finales, es posible disminuir las implicaciones ambientales actuales.

1.4. Hipótesis

Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el sector transporte público sin itinerario fijo en la zona metropolitana de Cuernavaca podrían reportar una disminución y una mejora en su sustentabilidad, a través de la sustitución de gasolina por gas natural.

1.5. Objetivo

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la sustentabilidad, incluyendo el impacto ambiental que tendrá la sustitución del combustible actual (gasolina) por Gas Natural Vehicular (GNV) en el sector transporte público sin itinerario fijo en la Zona Metropolitana de Cuernavaca.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar y caracterizar el transporte público sin itinerario fijo de la zona metropolitana de la ciudad de Cuernavaca.
- Evaluar las emisiones que implica el cambio de combustible en las unidades del transporte público sin itinerario fijo en la zona metropolitana de la ciudad de Cuernavaca.
- Generar recomendaciones para el desarrollo sustentable de un sistema de transporte público sin itinerario fijo en la zona metropolitana de la ciudad de Cuernavaca.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes de los vehículos de combustible

En 1769 aparece el primer vehículo propulsado a vapor creado por Nicholas-Joseph Cugnot, el cual era prácticamente un triciclo que llevaba por nombre “Fardier”.

Durante el siglo XIX la evolución del automóvil se vio obstaculizada por acciones legales y censuras del público en general, debido a los peligros que traía implícito un móvil de 4 toneladas, a lo que por entonces eran consideradas altas velocidades y el uso de calderas para generar el vapor que los impulsaba. Lejos de truncar su desarrollo, en este siglo se desarrollaron varios automóviles con distintas opciones de propulsión, como fue el de Josef Bozek propulsado con aceite o el de Robert Anderson, propulsado por baterías eléctricas no recargables. A partir de 1860, aparecen vehículos de combustión interna, como el de Etienne Lenoir a gas de carbón.

En el año 1885, el alemán Karl Benz introdujo el primer automóvil impulsado por un motor de combustión interna con derivados del petróleo. Este nuevo vehículo contaba con las ventajas de desarrollar mayores potencias con el poco combustible relativo a los antecesores, mayor autonomía y facilidad para transportar el combustible (Gómez, 2014).

Pero fue hasta 1895 con la aparición de los primeros automóviles que se necesitó la gasolina, ese nuevo combustible que en los años posteriores se consumiría en grandes cantidades. En vísperas de la primera guerra mundial, antes de 1914, ya existían en el mundo más de un millón de vehículos que usaban gasolina.

Sin embargo, el petróleo que algunas veces aparecía en la superficie de la tierra se usó como remedio, pero luego se empleó como combustible para

alumbrado entre 1900 y 1920. Por la destilación fraccionada se obtuvo gasolina para automóviles primero y después para aviones; luego se obtuvo el aceite y el diésel y para 1950 se obtuvieron diversos productos y sus derivados como queroseno y gas combustible, lo que convirtió al petróleo en un elemento imprescindible para el desarrollo de los países.

En efecto, la verdadera proliferación de automóviles se inició cuando Henry Ford lanzó en 1922 su famoso modelo "T". En ese año había 18 millones de automóviles, para 1938 el número subió a 40 millones en 1956 a 100 y a más de 170 millones para 1964.

Lógicamente el consumo del petróleo crudo para satisfacer la demanda de gasolina ha crecido en la misma proporción. Se dice que en la década de 1957 a 1966 se usó casi la misma cantidad de petróleo que en los 100 años anteriores (Montiel, 2009).

El origen de los vehículos de combustible alternativo se remonta a hace más de cien años donde tuvieron una mayor aceptación, sin embargo, fue en el año 1973 que derivado de la primera gran crisis del petróleo, el gobierno de Estados Unidos dio oportunidad a los combustibles alternativos como el etanol y el metanol, ya que la dependencia del petróleo era indispensable en esos tiempos.

La idea de la búsqueda de un vehículo que funcione con un combustible diferente a la gasolina sigue vigente en nuestros días, aunque sus antecedentes provienen desde hace cien años, cabe mencionar no se estará conforme hasta que los vehículos se vuelvan totalmente sustentables para beneficio del medio ambiente y así disminuir el uso de los combustibles fósiles (Díaz, 2017).

2.1.2. Antecedentes del GNV

El uso de GNV como combustible vehicular se propuso a principios de 1930 en Italia (Ravindra, Wauters, Tyagi, & Van Grieken, 2006), pero el primer reto

que experimentó fue en la década de 1970, cuando los precios del petróleo subieron durante finales de 1970 y principios de 1980, el mercado de vehículos de GNV se hizo más atractivo. Sin embargo, el período posterior hasta 2000, con precios menores del petróleo ha hecho que sea difícil competir como combustible vehicular para el GNV. Después del año 2000, los precios del petróleo se encarecieron una vez más y debido a esto los vehículos de GNV tiene la oportunidad de demostrar que es un combustible más limpio y barato. Desde ese momento, los vehículos de gas natural han entrado y salido del mercado de transporte de varios países/regiones en diferentes momentos, con el avance de la tecnología (Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015).

En 2018, durante la tercera edición de AltFuels México, representantes de la industria enfocada al manejo de gas natural dieron a conocer la Asociación Mexicana de Gas Natural Vehicular (AMGNV), que contó con la participación de más de 100 compañías. Andrés Bayona Insignares, el presidente del organismo, detalló que el valor de este sector tendrá un crecimiento exponencial, debido a las políticas mundiales de transición energética.

Rolando Madrazo, el director general de Gazo en 2018, detalló que en el país existen más de 15 mil conversiones automotrices hacia esta fuente de energía (Lastiri, 2018).

2.1.3. Antecedentes históricos de emisiones

Como se mencionó anteriormente y de acuerdo con datos históricos de la IEA (Agencia Internacional de Energía por sus siglas en inglés) el sector transporte es uno de los mayores emisores de CO₂ en México y el mundo.

En la Figura 1 se muestra el histórico de emisiones de CO₂ por sector de México; en 1990 el sector transporte representaba el 33% de las emisiones nacionales con 83 Mtoe de CO₂, para el año 2000 aportaba el 29% con 106 Mtoe de CO₂, para el año 2010 proporcionaba 34% con 151 Mtoe de CO₂ y finalmente en 2018 sumaba 35% con 157 Mtoe de CO₂.

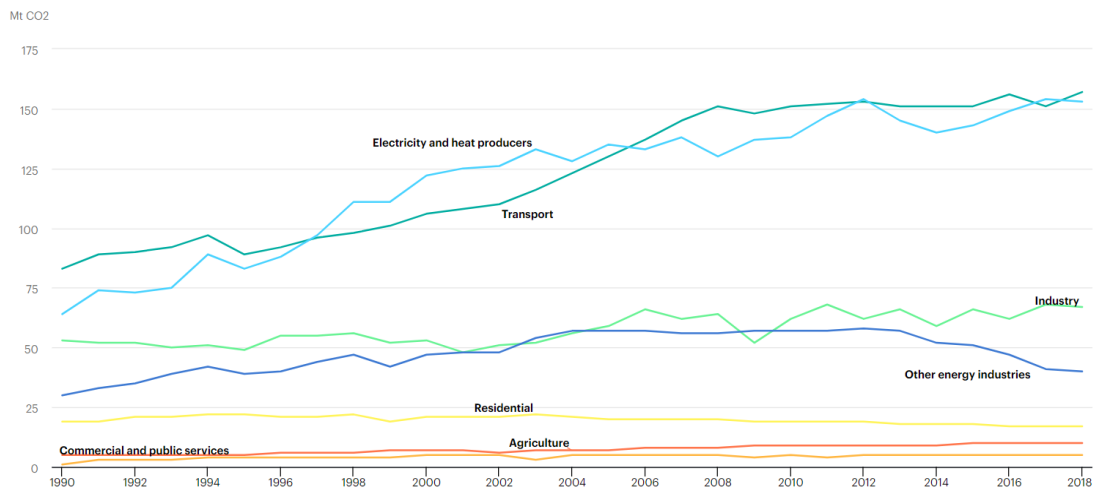


Figura 1. Emisiones de CO₂ por sector, México 1990-2018 (IEA, 2019)

2.2. Características de los combustibles

A continuación, se muestra un análisis de los combustibles propuestos para este estudio. Antes es necesario comprender algunos conceptos básicos que nos indican las propiedades de cada combustible y son de gran utilidad en la selección correcta de éste.

Estado: Influye en su almacenamiento y dispensación. Se clasifican dependiendo de su estado en sólidos, líquidos y gaseosos.

Composición química: Es la representación de los elementos que forman un compuesto; a partir de esta podemos extraer la mezcla estequiométrica.

Octanaje: Determina la forma en que detona el combustible en el cilindro del motor. A mayor octanaje, la combustión generada es más uniforme y controlada.

Masa molar: Propiedad física definida como la masa por unidad de cantidad de sustancia.

Mezcla estequiométrica: Es la relación entre la cantidad de aire y la de combustible necesario para que se produzca la combustión completa.

Densidad: Relación existente entre una masa de combustible y el volumen que ocupa en unas condiciones de referencia de presión y temperatura dadas.

Densidad relativa: Es la relación existente entre la densidad del combustible y la densidad de un elemento de referencia. Para sólidos y líquidos el elemento de referencia es el agua (1000 kg/m^3), y para gases es el aire (1.293 kg/m^3).

Poder calorífico (PC): Es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

Poder calorífico interior (PCI): Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible sin que condense el vapor de agua que contiene.

Límites de inflamabilidad: Es la concentración mínima y máxima de combustible en el aire para que se produzca la combustión, por debajo se le considera “mezcla demasiado pobre” y por encima se le considera “mezcla demasiado rica”.

Temperatura de autoignición: Temperatura mínima a la que un combustible en contacto con el aire, arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de calor exterior.

En la Tabla 1 se presenta un concentrado de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles a tratar, así resaltando el poder calorífico, siendo de 42.7 MJ/kg el de la gasolina y 50.05 MJ/kg el del GNV; al tener un poder similar nos asegura poder mover la unidad móvil con una cantidad semejante.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de gasolina, GNV (Naturgy, 2020) (BP, 2020) (Repsol, 2016) (PEMEX, 2015)(Chen, Wang, & Zeng, 2019)

Propiedades	Unidades	Gasolina	GNV
Estado	-	Líquido	Gaseoso
Composición química	-	C ₈ H ₁₈	CH ₄
Octanaje	-	95	120
Masa molar	kg/mol	109	18.2
Relación estequiométrica	aire-comb	14.7	17.4
Densidad relativa	kg/m ³	0.770	0.54 - 0.66
Poder calorífico	MJ/kg	42.7	50.05
Límites de inflamabilidad	%vol aire	1.4 - 7.6	4.3 - 15.2
Temperatura de autoignición	°C	200	525

2.3. Experiencias previas

En esta sección se muestra algunos estudios que se han realizado en diferentes partes del mundo, tratando de aumentar la sustentabilidad con un cambio de combustible en el sector transporte, evaluando únicamente el apartado ambiental, sin preocuparse por los efectos sociales y económicos adyacentes como se aborda en este documento.

2.3.1 El desarrollo del gas natural como combustible de automoción en China

Estudiantes del departamento de ingeniería térmica de la universidad Tsinghua (Ma, Geng, Li, Liu, & Li, 2013) en Beijing, China. Se presenta un breve resumen de la explotación de gas natural en China y proporcionar una estimación del potencial del gas natural como combustible de automoción. Se describe el desarrollo de vehículos de GNC (Gas Natural Comprimido) y vehículos de GNL (Gas Natural Licuado) desde cuatro perspectivas, incluyendo los mecanismos técnicos, rendimiento tecnológico, la aplicación comercial, y las cuestiones de política clave involucrados. En él se analizó sistemáticamente los puntos anteriormente mencionados, sobre todo a través de una revisión de la literatura, y determinar importantes implicaciones

políticas. Se concluyó que el potencial de aumentar el uso de gas natural como combustible de automoción es bastante grande. Para promover el desarrollo de gas natural como combustible de automoción, además de asegurar el suministro, es importante el apoyo para la construcción de estaciones de llenado, desarrollar una política de precios favorable, y mejorar la tecnología de investigación y desarrollo de vehículos de GNV.

2.3.2 Análisis de emisiones de CO₂ para diferentes combustibles en la población de taxis en Pereira y Dosquebradas

El estudio de la universidad tecnológica de Pereira (Mosquera, Fernandez Heao, & Mosquera M., 2010) en Colombia. Por medio de encuestas al sector de los taxistas usando un muestreo sistemático y posteriormente con ecuaciones estequiométricas enfrenta dos tipos de combustibles, Gasolina y Gas Natural Vehicular, contra el uso del biocombustible Etanol en mezclas Etanol – Gasolina en diferentes proporciones. Se concluyó que, aunque la utilización del Etanol mezclado con la Gasolina aumenta el consumo volumétrico de combustible, presenta menores emisiones de CO₂ en comparación a la utilización de la Gasolina actual. Sin embargo, al comparar los sistemas de combustión que usan el GNV, el cambiar el combustible a Etanol representa un aumento en las emisiones de CO₂. Esto significa que, desde una primera aproximación, es ecológicamente más rentable la utilización del GNV que las mezclas Gasolina – Etanol.

2.3.3 Reducción de las emisiones de CO₂ en vehículos de transporte: combustibles alternativos

En el estudio (Ortiz Mateo, 2010) se analizaron diversos combustibles, buscando ventajas medioambientales y técnicas con base en las características de los mismos; mostró que la utilización del gas natural comprimido debe incrementarse, por ser un combustible abundante, tener una mayor diversificación geográfica de los yacimientos, lo que supone una ventaja en caso de conflicto. Al ser un combustible limpio y barato, no requiere refino,

debiendo pasar a utilizarse no solo por el transporte público sino ampliamente por el privado.

2.3.4 Efectos ambientales de la electromovilidad en un transporte público urbano sostenible

La investigación realizada por (Pietrzak & Pietrzak, 2020) tuvo como objetivo identificar y analizar los efectos derivados del despliegue de autobuses de eléctricos en el transporte público urbano en la ciudad de Szczecin, Polonia. La producción de energía eléctrica basada predominantemente en combustibles fósiles impide el logro de los supuestos efectos de la electromovilidad en toda su extensión, limitándolos principalmente al desplazamiento geográfico de la contaminación de las áreas urbanas a otras áreas. Obviamente, las ciudades desean un cambio geográfico, ya que influye directamente en la reducción de la contaminación en su área. Sin embargo, no resuelve los problemas de contaminación del aire desde una perspectiva global.

En la Figura 2, se muestra la proyección de emisiones que resultaría de la compra y mantenimiento de autobuses a diésel y eléctricos; para los 14 años que se presentan en la figura, el escenario proyectado para los autobuses eléctricos tendría emisiones más elevadas en comparación con el escenario de los autobuses a diésel.

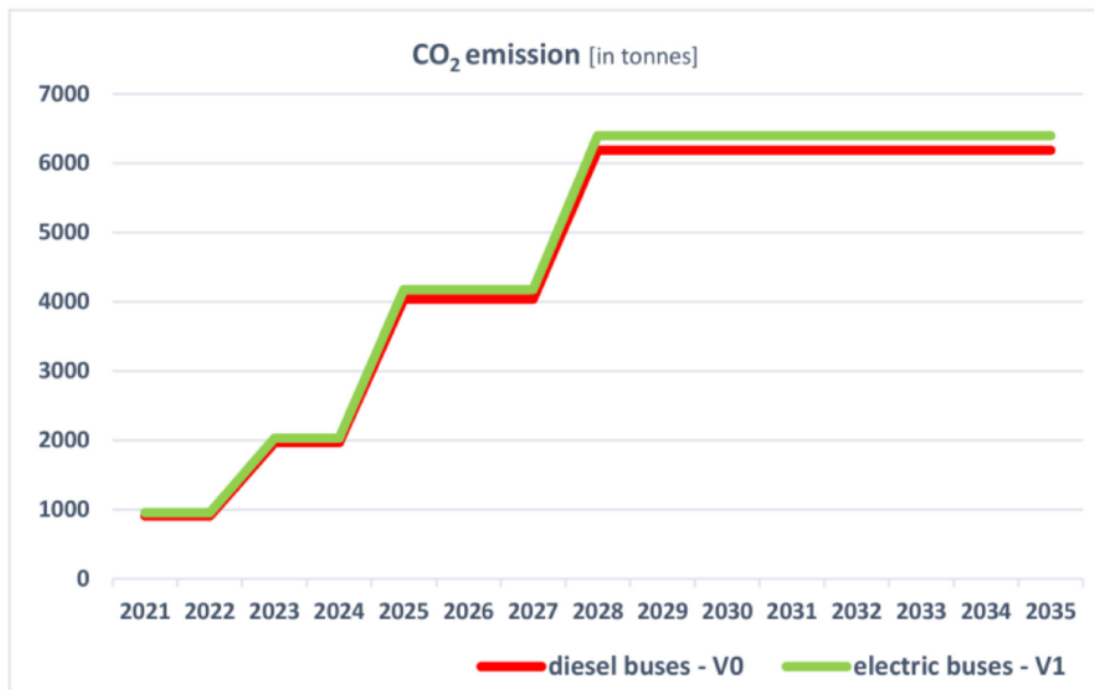


Figura 2. Emisiones resultantes de la compra y mantenimiento de autobuses diésel y eléctricos (Pietrzak & Pietrzak, 2020)

2.3.5 Automóviles eléctricos con una mochila para clima pesado sobre la marcha

El instituto de investigación Joanneum Research ha evaluado las emisiones de CO₂ de los automóviles de la llamada "Clase Golf", tomado en cuenta su ciclo de vida, desde la fabricación, vida útil y disposición y reciclaje de las unidades y el combustible. Consideran se recorren 15,000 kilómetros por año y tienen una vida útil total de 15 años. (Kroher, 2019).

En la Figura 2 se muestra la evaluación. En la "clase golf" el vehículo de gas natural tiende a un equilibrio. Sus emisiones de gases de efecto invernadero son más bajas que las de los vehículos eléctricos durante todo el ciclo de vida, utilizando la combinación de electricidad alemana. En comparación con los combustibles en estado líquido, el automóvil eléctrico solo puede explotar sus ventajas después de aproximadamente 127,500 km en comparación con la

gasolina o aproximadamente 219,000 km en comparación con el diésel. La razón de esto es la costosa producción de las baterías, que ya trae consigo una gran "mochila de gases de efecto invernadero".

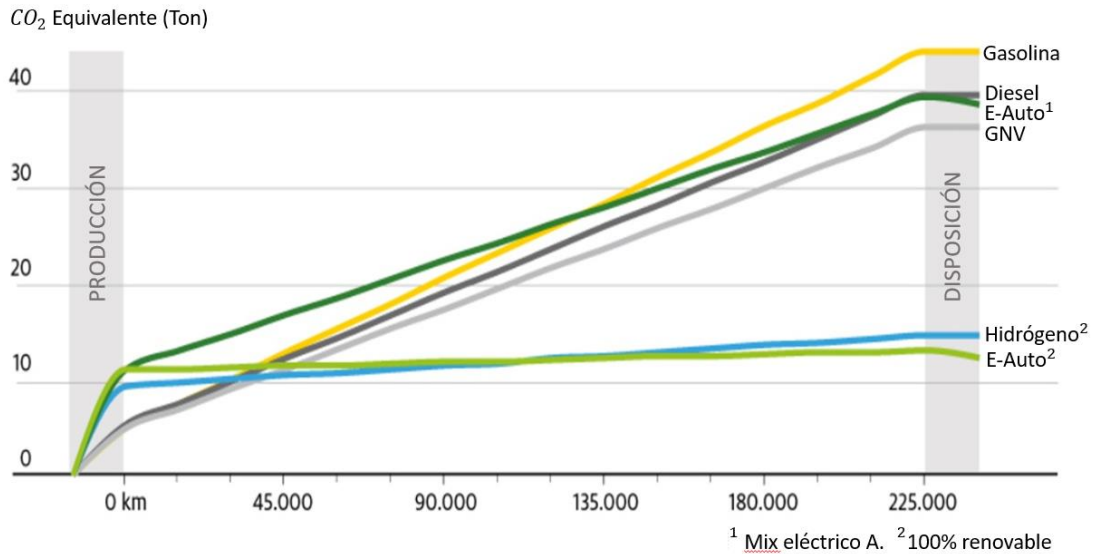


Figura 3. Emisiones de GEI de la vida de un automóvil (Kroher, 2019)

Solo un automóvil eléctrico que se alimente con energía 100% renovable tendría una huella de carbono significativamente menor a los demás tipos de unidades. La amortización de las altas emisiones de gases de efecto invernadero de la producción se lleva a cabo después de aproximadamente 37,500 km en comparación con el motor de gasolina o después de aproximadamente 40,500 km en comparación con el diésel. En comparación con el vehículo de gas natural, el automóvil eléctrico con electricidad renovable se ve amortizado aproximadamente a los 48,000 km.

En comparación con el vehículo de pila de combustible (con hidrógeno de una fuente renovable), el automóvil eléctrico con electricidad renovable es mejor desde aproximadamente 115,500 km, pero ambos están muy juntos en el equilibrio del ciclo de vida completo.

2.4. Incidencia del transporte

La importancia social, económica y ambiental del transporte es indiscutible. La sociedad valora cada día más la movilidad y tiene un efecto significativo en su calidad de vida.

2.4.1. Incidencia en la sociedad

El conjunto de infraestructuras y servicios cuyo funcionamiento coordinado define el sistema de transporte en cualquier sociedad representa una pieza esencial para la economía moderna. De hecho, gran parte del incremento del bienestar personal y material que hemos alcanzado en los últimos cincuenta años puede explicarse por el continuo avance y mejora de los sistemas de transporte, tanto en su dotación física y distribución territorial como en sus procedimientos de gestión e implementación práctica.

Uno de los argumentos que permiten justificar esta idea se basa en que la mayoría de las transacciones económicas no pueden llevarse a cabo hoy en día sin depender de la existencia de un flujo permanente de materias primas, productos y servicios que se desplacen entre ciudades, regiones y países. La contribución del transporte a la sociedad moderna no se limita a este papel dinamizador del comercio. El aumento sin precedentes de la movilidad de personas, junto con las mejoras en la accesibilidad de los distintos territorios mediante importantes inversiones en infraestructuras y servicios de transporte, ha incrementado notablemente las posibilidades de los ciudadanos para elegir lugar de residencia, trabajo u ocio, y a las sociedades en su conjunto les ha ofrecido generalmente la posibilidad de alcanzar mayores niveles de bienestar y cotas más amplias de equidad (Campos Méndez, Quevedo, & Pilar, 2010).

En 2013, la mala calidad del aire trajo consigo un saldo para todo el país de 37,488 muertes prematuras, 103,000 hospitalizaciones y 6 millones de consultas médicas; sólo de la ciudad de Cuernavaca trajo un saldo de 136 muertes prematuras, 260 hospitalizaciones y 20,835 de consultas médicas (IMCO, 2013).

La revista Forbes (Forbes Staff, 2019) menciona entre los daños ocasionados por el aire contaminado, llamado también “asesino silencioso” por la Organización Mundial de la Salud (OMS), están el envejecimiento de la piel, urticaria y huesos frágiles; otras afectaciones en distintas partes del cuerpo son las siguientes.

- **Pulmones y corazón:** Asma, enfisema, cáncer de pulmón e incremento al riesgo de ataques al corazón debido al estrechamiento de las arterias y el debilitamiento de los músculos.
- **Cerebro:** Accidentes cerebrovasculares, demencia y reducción de inteligencia. También hay evidencia de que dormir mal puede ser una consecuencia de respirar aire tóxico.
- **Órganos abdominales:** Daños al hígado (responsable de eliminar las toxinas del cuerpo), numerosos tipos de cáncer, incluidos el de vejiga y el intestino; además, se ha encontrado un aumento en el síndrome del intestino irritable.
- **Fertilidad, bebés y niños:** La contaminación reduce la fertilidad y aumenta los abortos espontáneos. En mujeres embarazadas, se han detectado contaminantes en las placentas que nutren a los fetos. Asimismo, la polución está relacionada con el bajo peso de los recién nacidos e impacta directamente en el desarrollo de los niños con problemas como pulmones atrofiados, obesidad, leucemia y problemas de salud mental (Forbes Staff, 2019).

2.4.2. Incidencia en la economía

El transporte juega un rol crucial en la economía; es un factor clave en la determinación de costos para los diferentes bienes y servicios que se comercializan en un mercado cada vez más exigente y cambiante. Su rol en

la industria es de suma importancia para el traslado de insumos, materias primas y productos terminados para diversas industrias y clientes en territorios nacionales e internacionales (Mendoza, 2015).

La gran mayoría de nuevos proyectos de carreteras se han justificado en términos de su capacidad para estimular el crecimiento económico, crear empleo y reducir la congestión (Whitelegg, 2010).

De esta manera, en 2013, este problema dejó pérdidas económicas de más de 20,000 millones de pesos; para el caso en particular de la ciudad de Cuernavaca tomando en cuenta muertes prematuras, hospitalizaciones y consultas médicas, nos llevó a una pérdida económica de 107 millones de pesos (IMCO, 2013).

“Una de las principales fuentes de polución en las zonas urbanas son los automóviles, y el fomento del uso del GNV representa una importante oportunidad para transportistas, empresas, gobiernos y sociedad, contrarrestando así la principal causa de afectación a la capa de ozono” Asociación Mexicana de Gas Natural (AMGN) (Solís, 2017).

Como una medida atractiva para el permisionario se puede replicar un modelo de financiamiento que han implementado otras ciudades del país; teniendo el beneficio de un enganche del 0% y la recuperación del costo del sistema de conversión se da por medio de un sobreprecio en el litro de GNV, de esta manera igualándolo al precio de la gasolina, una vez pagado el sistema, se pagara el litro a precio público.

2.4.3. Incidencia en el ambiente

Las emisiones que vienen por transporte son bastante importantes y de hecho en Latinoamérica es uno de los de los principales contribuyentes a las emisiones. Todas las medidas que aborde este sector tienen la posibilidad de representar un paso determinante para lograr el objetivo de 1.5 grados Celsius

planteado por el IPCC (el umbral para evitar efectos devastadores en nuestros sistemas de vida) (IMCO, 2013).

La contaminación del aire daña la salud de la población expuesta, lo que genera altos costos en el sistema de salud y reduce la productividad de los trabajadores. Dichos impactos limitan la competitividad de las ciudades, pues afecta la calidad de vida de los ciudadanos, ahuyenta al talento y, por tanto, puede incluso limitar la llegada de nuevas inversiones (Quiñones, 2019).

Según un reciente estudio de National Geographic, evaluando 3,000 ubicaciones en 103 países, el 92% de la población mundial vive en lugares en los que se excede el nivel máximo de contaminación atmosférica permitido por la OMS (National Geographic, 2019).

En el caso de la concentración de partículas suspendidas menores a 10 micras, la OMS recomienda una concentración de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (OMS, 2005) y la ciudad de Cuernavaca reportó un promedio anual de $38.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (INECC, 2020)

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se desarrolla e implementa la metodología propuesta, para evaluar la sustentabilidad por sustitución de combustible en el sector transporte público sin itinerario fijo en la Zona Metropolitana de la ciudad de Cuernavaca, la cual se muestra en la Figura 3.

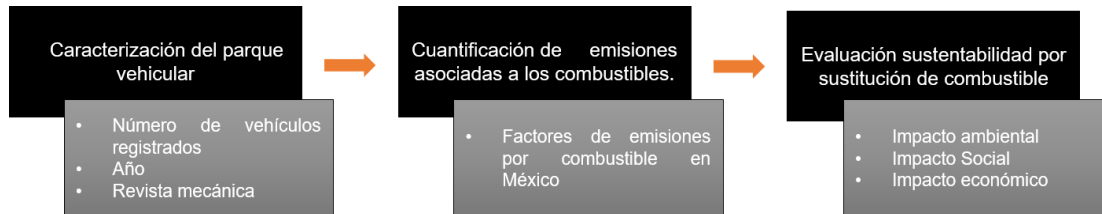


Figura 4. Metodología propuesta. Elaboración propia

Para la evaluación social y económica de este estudio se utiliza una calculadora desarrollada por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) en el 2012, de esta manera, actualizando los datos y las fuentes que usaron, al mismo tiempo acotándolo a la ciudad de Cuernavaca.

A continuación, se presenta una lista de las suposiciones en las que se basa la calculadora:

1. El número de consultas registradas en el Sistema Único de Información para la Vigilancia Epidemiológica (SUIVE) equivale por lo menos a una consulta familiar, razón por la cual fueron contabilizados. No se encontraron registros para determinar cuántos de estos casos pasaron a consulta de especialidades, análisis de laboratorio u hospitalización.
2. Las consultas y los egresos hospitalarios se distribuyen de forma homogénea en todo el estado. Como se menciona en la sección anterior, las consultas y los egresos hospitalarios se publican a nivel estatal. Este supuesto permite asignarle a cada zona metropolitana una

parte proporcional de los indicadores, según el porcentaje que representa la población sobre el total del estado.

3. Las concentraciones de partículas no cambian al interior de las ciudades, no hay diferencias geográficas. Por ello se asume una sola concentración base para cada ciudad.

3.1. Caracterización del parque vehicular

Se debe realizar la caracterización del parque vehicular para determinar la situación actual de las emisiones por fuentes móviles.

Para esta caracterización de la Zona Metropolitana de la ciudad de Cuernavaca se contempló al servicio de transporte público sin itinerario fijo por parte del estado (taxis) y las compañías de transporte privado que se encuentran prestando servicio actualmente (Uber y Didi); lamentablemente no estuvieron interesados en participar en el estudio. Por lo tanto, se ocuparon datos obtenidos del portal de INEGI (INEGI, 2018).

En 2018, en el estado de Morelos circulaban 592,631 vehículos, sin considerar el transporte que atraviesa el estado para transitar hacia otros destinos y que se abastece de combustible en estaciones de servicio ubicadas dentro de Morelos, o los vehículos con placa de otros estados que arriban al estado como destino turístico u otra actividad. La distribución de estos vehículos por municipio muestra a Cuernavaca concentrando el 34% del total de la flota a nivel estatal, seguido por Jiutepec, 13% y Cuautla, 11%, que en conjunto estos municipios concentran el 58% del total de la flota vehicular estatal. El resto (42%) se distribuye en los 30 municipios restantes (SEMARNAT, 2014).

En el año 2018 se contaba con 23,345 vehículos registrados en el estado, destinados al transporte público (automóviles, camiones de pasajeros, camionetas y camiones de carga), siendo 16,681 automóviles. Se toma en cuenta que Cuernavaca consta de una zona metropolitana y esta consta de 8 municipios (Secretaría de desarrollo sustentable, 2020) y la distribución de los

vehículos para ese año se encuentra ordenada como sigue: Cuernavaca, 8,079, Emiliano Zapata, 561, Jiutepec, 2,135, Temixco, 960, Huitzilac, 187, Tepoztlán, 316, Xochitepec, 421 y Tlaltizapán de Zapata, 76, dando un total de 12,735, representando el 76.35% del parque vehicular del estado. En voz de concesionarios que llevan aproximadamente 10 años dedicados al servicio público de transporte, señalan que el uso es de entre 11 y 15 horas diarias.

3.2. Cuantificación de emisiones asociadas por sectores

Es necesario realizar la cuantificación de emisiones asociadas a los combustibles para examinar los campos en los que impactará un cambio de combustible.

En el año 2018, el transporte reportó en México 34.97% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a la producción y uso de la energía, siendo equivalente a 157 Mtoe de CO₂. Colocando a este sector como el mayor emisor de CO₂, seguido por de la producción de electricidad y calefacción con 34.08%, equivalentes a 153 Mtoe de CO₂ (IEA, 2019).

La Tabla 2 muestra la información presentada en el Inventario de Emisiones la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos por fuente emisora del año 2014, considerando los resultados de emisión tanto para fuentes naturales como antropogénicas, las emisiones en ésta tabla se muestran en Mg/año; en la Figura 4 se aprecia su equivalente porcentual.

Para el inventario se consideraron como fuentes antropogénicas 35 categorías: 11 categorías de fuentes móviles (vehículos automotores clasificados), 15 sectores de fuentes fijas (industria), 5 categorías de fuentes de área agrícola, combustión, evaporativas, incendios y misceláneas), dentro de las cuales se estimaron emisiones a 29 subcategorías; así como 4 categorías de fuentes móviles que no circulan por carretera (locomotoras, aeronaves, lanchas recreativas y centrales de autobuses). Asimismo, se

integró la información de fuentes naturales (biogénicas y erosivas), contando con un total de 37 categorías, 35 de tipo antropogénico y 2 naturales.

Por parte de los contaminantes se muestra partículas PM₁₀, contaminante emitido principalmente a nivel estatal por las fuentes de área en un 63.6%. Partículas PM_{2.5}, las fuentes de área contribuyen con una emisión del 72.2% de este contaminante. Dióxido de azufre SO₂, las fuentes fijas son el principal emisor de este contaminante (78.8%). Monóxido de carbono (CO), Las fuentes móviles contribuyen con la emisión del 69.8%. Óxidos de nitrógeno (NO_x), son emitidos en un 49.7% por los vehículos automotores que circulan por carretera. Compuestos orgánicos volátiles (COV), contaminante liberado en un 51.8% por fuentes de área. Amoniaco (NH₃). Este contaminante es liberado en un 97.6% por el estiércol generado en los sistemas ganaderos, así como por la degradación de residuos en casa habitación. Estas actividades se ubican básicamente en Ayala y Yecapixtla (SEMARNAT, 2014).

Tabla 2. Inventario de emisiones por fuente para el estado de Morelos en Mg/año (SEMARNAT, 2014)

Fuente	Mg/año						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV	NH ₃
Fijas	1,745.2	1,069.2	2880.5	2,115.9	7,540.1	1,515.5	5.3
Área	7,937.8	6,231.3	312.7	40,310.5	3,863.6	47,698.3	5,864.9
Móviles carreteras	1,014.6	927.5	460.7	99,545.1	18,400.4	10,253.5	137.6
Móviles no carreteras	5.45	4.95	3.27	601.4	41.7	237.1	0.01
Naturales	1,781.6	395.5	-	-	7,141	32,452.0	0
Total	12,484.7	8,628.6	3,657.2	142,572.9	36,986.8	92,156.4	6,007.8

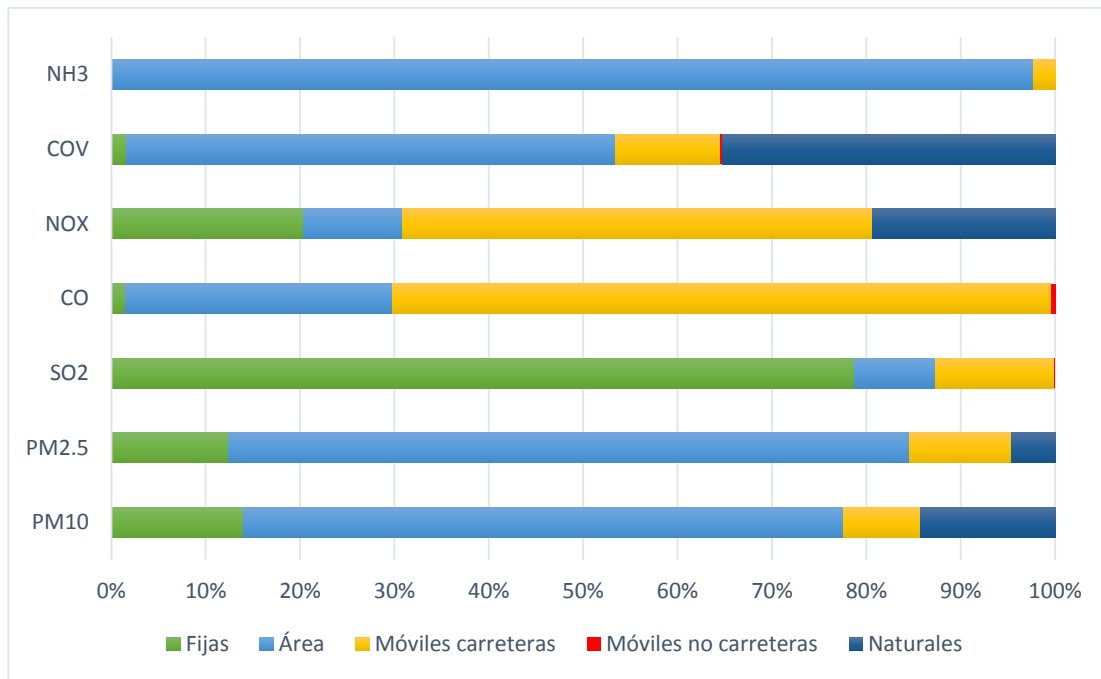


Figura 5. Inventario de emisiones por fuente para el estado de Morelos en porcentaje (SEMARNAT, 2014)

3.3. Evaluación de la sustentabilidad por sustitución

La evaluación de la sustentabilidad es lo más importante de este estudio, ya que es directamente el impacto que tendrá en el día a día y en la calidad de vida no sólo de la parte administrativa sino también y más importante en los usuarios finales. Así que dicha evaluación se dividió en 3 secciones, evaluación del impacto social, económico y ambiental que tendrá el cambio de combustible.

3.3.1. Evaluación del impacto social

De acuerdo con INECC las Funciones Concentración-Respuesta (FCR) indican la probabilidad de ocurrencia de un impacto a la salud en función a un cambio dado de concentraciones de contaminantes, por lo que, son el componente más importante para estimar los impactos en salud atribuibles a

la contaminación del aire. Las FCR se representan por distintas métricas, siendo la más común el Riesgo Relativo (RR), mismas que se derivan de estudios epidemiológicos (INECC, 2016).

$$RR = e^{\beta(\Delta conc)}$$

Ecuación 1. Riesgo Relativo

Donde β es el estimador y $\Delta conc$ es la diferencia entre la concentración base de la ciudad y la concentración objetivo.

La calculadora utilizada antes mencionada, será utilizada para identificar los daños en salud provocados, tomando en las partículas con un diámetro menor a 10 micrómetros (PM_{10}) como un indicador de la contaminación del aire, ya que estas influyen directamente a la salud, pues no sólo se han asociado con padecimientos respiratorios y cardiovasculares, sino también con muertes prematuras. Adicionalmente, tomaremos como indicador para evaluar este apartado las consultas, hospitalizaciones y muertes prematuras asociadas a la contaminación del aire.

Para iniciar este apartado se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Población (INEGI, 2015)
- Concentración promedio anual de PM_{10} (SEMARNAT, 2019)
- Concentración objetivo (OMS, 2005)
- Muertes totales (INEGI, 2019)
- Casos por asma, enfermedades isquémicas del corazón y enfermedades respiratorias agudas (Secretaría de Salud, 2019)

Se consideró dos escenarios con base en dos grupos de estimadores. Estos datos servirán como punto de partida para posteriormente hacer el conteo de

la reducción con base en la literatura que tendría al efectuar el cambio de combustible en el mencionado sector transporte.

3.3.1.1. Escenario uno

El primer escenario, en él se incluyen estimadores (β) para calcular los egresos hospitalarios por causas respiratorias y las muertes atribuibles a la contaminación; surgen a partir de una metodología desarrollada por IMCO y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimadores IMCO con intervalo de confianza al 95% (IMCO, 2013)

Impacto en salud	Estimadores (β)		
	Media	Límite inferior	Límite superior
Consultas por asma (Choudhury, Gordian, & Morris, 1997)	0.0037	0.0021	0.0052
Consultas por infecciones respiratorias agudas (Stieb, y otros, 2000)	0.0017	0.0003	0.0029
Consultas por enfermedades isquémicas del corazón (Stieb, y otros, 2000)	0.0055	0.0017	0.0092
Hospitalizaciones por infecciones respiratorias	0.0027	0.0011	0.0042
Hospitalizaciones por enfermedades respiratorias	0.0016	-0.0001	0.0033
Hospitalizaciones por enfermedades cardiovasculares (Le Tertre, y otros, 2002)	0.0006	0.0003	0.0009
Muertes prematuras por todas las causas	0.0006	0.0002	0.001

3.3.1.2. Escenario dos

Además de las estimaciones de IMCO, se hizo una revisión exhaustiva de la literatura epidemiológica, así como pláticas con expertos del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). A partir de éstas se encontraron otros estimadores para hospitalizaciones por causas respiratorias y muertes totales, así como estimadores para hospitalizaciones por causas cardiovasculares y consultas por asma, infecciones respiratorias agudas y enfermedades isquémicas del corazón.

La literatura naturalmente presenta riesgos relativos (RR) ante un determinado cambio en la concentración (el más común es de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2005)). Sin embargo, para calcular los impactos atribuibles a la contaminación usando diferentes cambios en concentración es necesario encontrar el estimador en el que se basan dichos RR. Para ello, se utiliza la Ecuación 2:

$$\beta = \frac{\ln(RR)}{\Delta conc}$$

Ecuación 2. Estimador.

Donde el $\Delta conc$ es el cambio en concentración que corresponde al riesgo relativo que se está evaluando.

3.3.1.3. Consultas asociadas

Para el cálculo de consultas atribuibles a la contaminación (C_{AT}) se utilizó la Ecuación 3:

$$C_{AT_i}^n = C_i^n \left(1 - \frac{1}{e^{\beta C n (\Delta conc)}} \right)$$

Ecuación 3. Consultas atribuibles a la contaminación

Donde C_i^n son los casos por tipo de padecimiento, n es el tipo de padecimiento (infecciones respiratorias agudas, asma y enfermedades isquémicas del corazón) y βCn es el estimador para visitas al médico por padecimiento.

En la Tabla 4 se muestran los estimadores (β) que nos brinda la literatura para calcular los egresos hospitalarios por causas respiratorias y las muertes atribuibles a la contaminación.

Tabla 4. Estimadores de la literatura epidemiológica

Impacto en salud	Estimadores (β)		
	Media	Límite inferior	Límite superior
Consultas por asma (Choudhury, Gordian, & Morris, 1997)	0.0037	0.0021	0.0052
Consultas por infecciones respiratorias agudas (Stieb, y otros, 2000)	0.0017	0.0003	0.0029
Consultas por enfermedades isquémicas del corazón (Stieb, y otros, 2000)	0.0055	0.0017	0.0092
Hospitalizaciones por causas respiratorias (Rosales-Castillo, Torres-Meza, Olaiz-Fernández, & Borja-Aburto, 2001)	0.0014	0.0012	0.0016
Hospitalizaciones por enfermedades cardiovasculares (Le Tertre, y otros, 2002)	0.0006	0.0003	0.0009
Muertes prematuras por todas las causas (Romieu, y otros, 2012)	0.0009	0.0007	0.0012

3.3.1.4. Hospitalizaciones asociadas

Para el cálculo de hospitalizaciones atribuibles a la contaminación (H_{AT}) se usó la Ecuación 4:

$$H_{AT_i}^n = H_i^n \left(1 - \frac{1}{e^{\beta Hn(\Delta conc)}} \right)$$

Ecuación 4. Hospitalizaciones atribuibles a la contaminación

Donde H_i^n son las hospitalizaciones por tipo de padecimiento, n es el tipo de padecimiento (infecciones respiratorias, enfermedades cardiovasculares y enfermedades respiratorias) y βHn es el estimador para hospitalizaciones por padecimiento.

3.3.1.5. Muertes prematuras asociadas

Para calcular las muertes, las hospitalizaciones y las consultas atribuibles a la contaminación del aire se siguió parte de la metodología de Riojas (Riojas, Álamo, Texcalac, & Romieu, 2012). Así que, una vez obtenidos los estimadores que se mencionaron en anteriores apartados, posteriormente se calculó las muertes prematuras atribuibles a la contaminación (M_{PA}), donde se usó la Ecuación 5:

$$M_{PA} = M_T \left(1 - \frac{1}{e^{\beta(\Delta conc)}} \right)$$

Ecuación 5. Muertes prematuras atribuibles a la contaminación

Donde M_T son las muertes totales y β es el estimador para muertes prematuras.

3.3.1.6. Reducción de impacto social

Al tomar como indicador al material contaminante PM_{10} y tomando en cuenta que al usar GNV se elimina este tipo de emisión, teóricamente los impactos asociados en los apartados anteriores (consultas, hospitalizaciones y muertes prematuras) al sector transporte se evitarían. Como vimos en la cuantificación de emisiones, el aporte a este material contaminante por parte del sector a evaluar no es alto, representando el 8.17% de las emisiones de PM_{10} , así que se podrían evitar los impactos asociados a ese porcentaje proveniente del sector transporte sin itinerario fijo de la zona metropolitana de la ciudad de Cuernavaca.

3.3.2. Evaluación del impacto económico

De la misma manera que el apartado de impacto anterior se utilizará la calculadora de IMCO para cuantificar los impactos económicos que se derivan de los daños en salud, para lo cual se consideró: gastos en salud (incluyendo consultas por enfermedades asociadas a la mala calidad del aire, hospitalización por las mismas, pérdida de productividad por muertes prematuras y por ausentismo laboral) y gasto en combustibles (actuales). Posteriormente una estimación de la reducción que implicaría, después de efectuar el cambio de combustible.

Para cuantificar los costos aunados al impacto a la salud se consideró gastos en salud, pérdida de productividad y gasto en combustibles, es necesario contar con los datos del apartado anterior y los siguientes parámetros:

- Egresos hospitalarios por infecciones y enfermedades respiratorias y cardiovasculares enfermedades (Secretaría de Salud, 2018)
- Salario mínimo diario (Secretaría del Trabajo, 2020)
- Porcentaje de familias donde ambos padres trabajan (INEGI, 2015)
- Porcentaje de población asegurada (INEGI, 2015)
- Costo de hospitalización diario para asegurados (SEGOB, 2019)
- Costo de hospitalización diario para no asegurados (Miranda, 2017)

- Días promedio de hospitalización (HRAEB, 2018)
- Precio por consulta familiar (SEGOB, 2019)
- Vida productiva (IMSS, 2019)
- Precio Gasolina (Petrointelligence, 2020)
- Precio GNV (Petrointelligence, 2020)

3.3.2.1. Impacto económico por gastos en salud

3.3.2.1.1. Costos por consultas

No es posible discernir qué tipo de tratamiento corresponde a los casos que reporta el SUIVE. Sin embargo, se puede asumir que todos estos casos se contabilizan debido a que por lo menos asistieron a una consulta familiar (primer nivel). Por ello, para calcular los costos en salud por consultas se multiplicó C_{AT} por el costo de una consulta familiar.

3.3.2.1.2. Costos hospitalarios

Las hospitalizaciones tienen un costo para el sistema de salud, además de generar una pérdida en productividad por ausentismo laboral.

3.3.2.2. Impacto económico por pérdida de productividad

La pérdida en la productividad que conlleva a una pérdida económica se midió en dos grupos:

- A causa de muertes prematuras.
- Por ausentismo laboral en caso de hospitalización o en caso de acompañar a un hijo pequeño.

3.3.2.2.1. Pérdida de productividad por muertes prematuras

La pérdida en productividad por muertes prematuras se calculó en diferentes pasos.

1. Se dividió a las muertes por grupo de edad.
2. Se identificó el remanente de los años de vida productiva (la cual empieza a los 15 años y termina a los 65 años) para cada grupo de edad. Por ejemplo, 3% de las muertes corresponden al grupo de 20-24 años (edad promedio: 22), lo que implica que a este grupo le quedaba 43 años de vida productiva.
3. Se multiplicaron estos años por el salario anual con base en los datos antes proporcionados.
4. Se sumó la pérdida en productividad para todos los grupos de edad.

3.3.2.2.2. Pérdida de productividad por ausentismo laboral

Para calcular las pérdidas en productividad por ausentismo laboral se implementaron los siguientes pasos.

1. Se multiplicó E_{AT} por el número de días de hospitalización promedio por padecimiento por el salario diario.
2. Se consideró un día laboral perdido para acudir a consulta, multiplicando C_{AT} por el salario diario.
3. El 7% de la población corresponde a menores de 15 años, por lo que se consideró que en 50% de los casos, alguno de los padres debe faltar a trabajar para cuidar al hijo o familiar.

3.3.2.3. Impacto económico por consumo de combustible

Implementando el modelo financiero que siguieron otras ciudades del país y tomando en cuenta precios recién ajustados, el promedio nacional de la gasolina magna (siendo la más consumida por el sector a evaluar) es 18.299 pesos por litro, y del GNV es de 9.284 pesos por litro (Petrointelligence, 2020),

En este caso existe una diferencia de 9 pesos por litro, si el usuario consume 30 litros diarios, estaría ahorrando 270 pesos al día o 7031 pesos al mes (sin incluir los domingos).

Se obtuvo el gasto anual de los 12,735 vehículos del sector a evaluar, multiplicando el precio de la gasolina por los 30 litros diarios consumidos y el resultado multiplicado por 312 días (año sin domingos).

3.3.2.4. Reducción de impacto económico

Se obtuvo la reducción anual que se tendría al cambiar de combustible a GNV sacando la diferencia del gasto anual de consumo de gasolina con respecto al gasto anual de consumo de GNV.

De la misma manera que en el apartado del impacto social, se reducirá el 8.17% del total generado por gastos médicos y pérdidas de productividad, ya que están directamente asociado a las emisiones móviles, pero esta vez se le agregó la reducción anual consumible por el sector expresada en el punto anterior.

3.3.3. Evaluación del impacto ambiental

Para la evaluación de este impacto se toma el CO₂ como indicador de contaminación ambiental ya que es una medida más cómoda para el ámbito y se reportan dos escenarios, el primer escenario a nivel teórico, con base en ecuaciones estequiométricas (Ecuación 6 y 7) mostradas en el siguiente apartado. El segundo escenario surge a partir de revisión de la literatura.

Antes de plantear un escenario de reducción de emisiones, se obtuvo un total de emisiones de CO₂ causada por el sector a evaluar. Esto se hizo multiplicando el número total de vehículos (12,735) por las emisiones por vehículo (206 g CO₂/km), por 312 días del año, de esta manera tenemos un punto inicial.

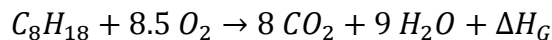
3.3.3.1. Escenario uno

La mezcla estequiométrica indica las unidades de aire que precisa una unidad de carburante para combustionar completamente, esto en el supuesto de que pudiéramos obtener una eficiencia térmica del 100%. Su cálculo se determina a partir de la reacción estequiométrica de combustión, ésta nos indica la cantidad de oxígeno que se necesita para quemar todo el combustible y a partir del oxígeno se determina la cantidad de aire equivalente.

Por medio de la estequiometría, podemos ver los componentes resultantes de la combustión, en este caso, nos interesa la cantidad de CO₂ resultante de la combustión.

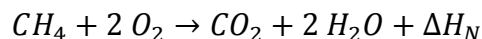
Gasolina magna

Para la gasolina hay más de una mezcla estequiométrica, para este estudio se utiliza la Ecuación 6 (Avella-Moreno, 2012):



Ecuación 6. Mezcla estequiométrica de la gasolina.

Gas Natural



Ecuación 7. Mezcla estequiométrica del gas natural

Donde ΔH_G en la Ecuación 6 corresponde a la entalpía de reacción de la gasolina y ΔH_N en la Ecuación 7 corresponde a gas natural.

3.3.3.2. Escenario dos

Después de una extensa búsqueda por la literatura, se sabe que el cambio de combustible de gasolina a GNV representa una reducción entre un 25% y 30% de emisiones de CO₂ (Ishii, y otros, 2008) (Ding, Chai, Han, Yang, & Shen, 2013) (Yang, Kraft-Oliver, Yang, & Min, 1997) (Ma, Geng, Li, Liu, & Li, 2013)

(Dong & Steinberg, 1997) (Chiodi, Ferrari, Mack, Bargende, & Wichelhaus, 2011) (Bach, y otros, 2004) (CONUEE, 2016) (Deloitte, 2019) (Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015), esto de acuerdo con la eficiencia térmica. Las pérdidas de energía que se tiene a lo largo del ciclo de trabajo de un motor. Se tiene perdidas en: radiador (28% aproximadamente.), block o paredes del motor (10% aproximadamente.), por el escape (32% aproximadamente.). Dejando sólo entre un 25% y 30% de la energía calorífica restante para transformarla en movimiento (Rivera, 2007).

Sin embargo, para este estudio se tomaron los factores de emisión para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), ya que está considerada dentro de la misma región que la Zona Metropolitana de Cuernavaca (ZMC) de acuerdo a la demanda regional de gas natural (SENER, 2018), por el lado de la gasolina magna ZMVM con un factor de emisión de 3.134 kgCO₂/kg de gasolina; por otro lado, al existir tres factores para el gas natural, ZMVM1, 2.78 kgCO₂/kg de gas natural, ZMVM2, 2.55 kgCO₂/kg de gas natural y ZMVM3, 2.77 kgCO₂/kg de gas natural; se calculó un promedio de estos, 2.7 kgCO₂/kg de gas natural, obteniendo así una reducción del 14% de emisiones de CO₂ alusivas al gas natural en comparación con la gasolina (INECC, 2014).

3.3.4 Proyección de los impactos

Para finalizar, se obtuvo el impacto social, ambiental y económico de la manera antes mencionada para los años 2011, 2014, 2017 y 2020, teniendo así un intervalo de 3 años entre cada uno, de ésta manera usando un método de proyección lineal se obtuvo una proyección a 3 años, siendo éste intervalo de tiempo el escenario deseable para realizar el cambio de combustible para todas las unidades del sector transporte público sin itinerario fijo.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Impacto social

Los resultados de este apartado son los siguientes, recordando que son cifras anuales. La Tabla 5 muestra los resultados de la aplicación de las ecuaciones 1 a la 5 reportadas en el Capítulo 3.

Tabla 5. Resultados de impacto social

	Número de casos atribuibles a la contaminación (Escenario 1)			Tasa de casos atribuibles a la contaminación por cada 100,000 habitantes (Escenario 1)		
	Muertes prematuras	Hospitalizaciones	Consultas	Muertes prematuras	Hospitalizaciones	Consultas
Escenario 2020	91	103	6,226	9	10	597
Escenarios futuros	84	94	5,717	8	9	549
Reducción	7	8	509	1	1	49

	Número de casos atribuibles a la contaminación (Escenario 2)			Tasa de casos atribuibles a la contaminación por cada 100,000 habitantes (Escenario 2)		
	Muertes prematuras	Hospitalizaciones	Consultas	Muertes prematuras	Hospitalizaciones	Consultas
Escenario 2020	138	72	6,226	13	7	597
Escenarios futuros	127	66	5,717	12	6	549
Reducción	11	6	509	1	1	49

4.1.1 Proyección del Impacto Social.

En este apartado se muestran los resultados graficados y separados por escenarios.

4.1.1.1 Escenario uno.

En la Figura 5 se muestra la proyección de muertes prematuras a 2023, en la cual se puede observar un aumento de 19% para la proyección máxima de los datos históricos, mientras se sigue la línea de tendencia de la gráfica, lo cual significa que de seguir utilizando la misma mezcla actual de combustibles para el sector transporte, la gráfica seguirá una línea ascendente. En el caso hipotético de que para 2023 se cambiara el parque vehicular del transporte público sin itinerario fijo (taxis), tendríamos una disminución de 7.6% con respecto al año 2020 y del 25% con respecto al máximo mencionado anteriormente.

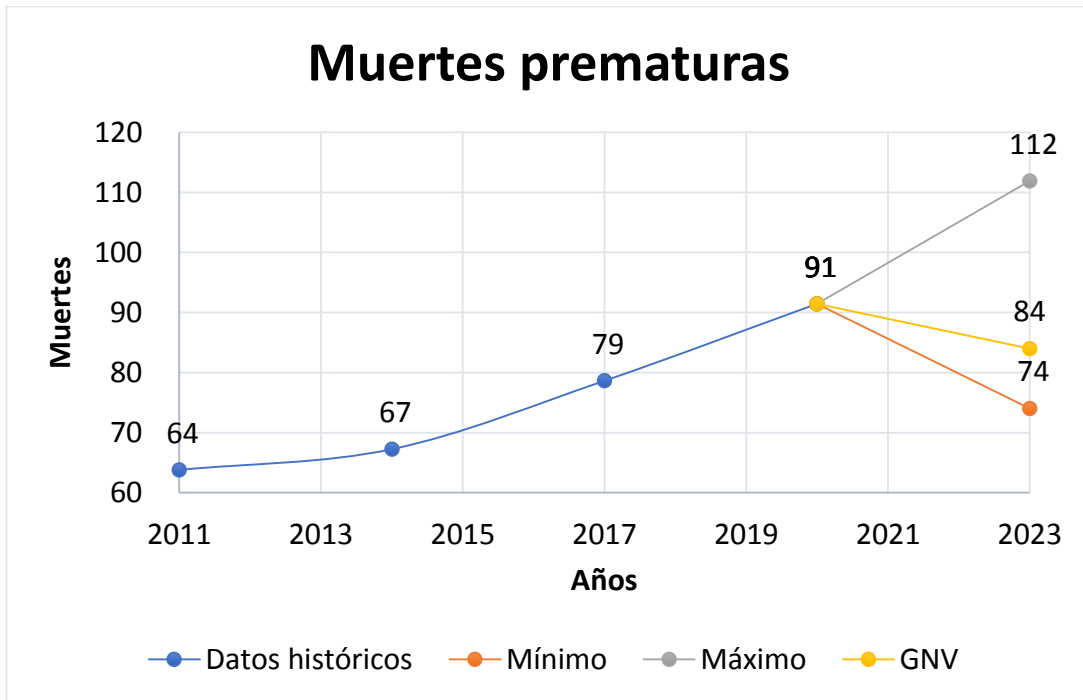


Figura 6. Proyección de muertes prematuras del escenario 1.

En la Figura 6 se puede observar un aumento de 20% de 2020 a 2023 y en caso de cambiar a GNV se muestra una disminución del 8.7% con respecto a 2020.

Por otro lado, en el caso de las consultas se muestra un aumento de 96% para el año 2023 en la proyección máxima y una disminución de 37% para el mismo año en caso de cambiar a GNV y se muestra en la Figura 7.

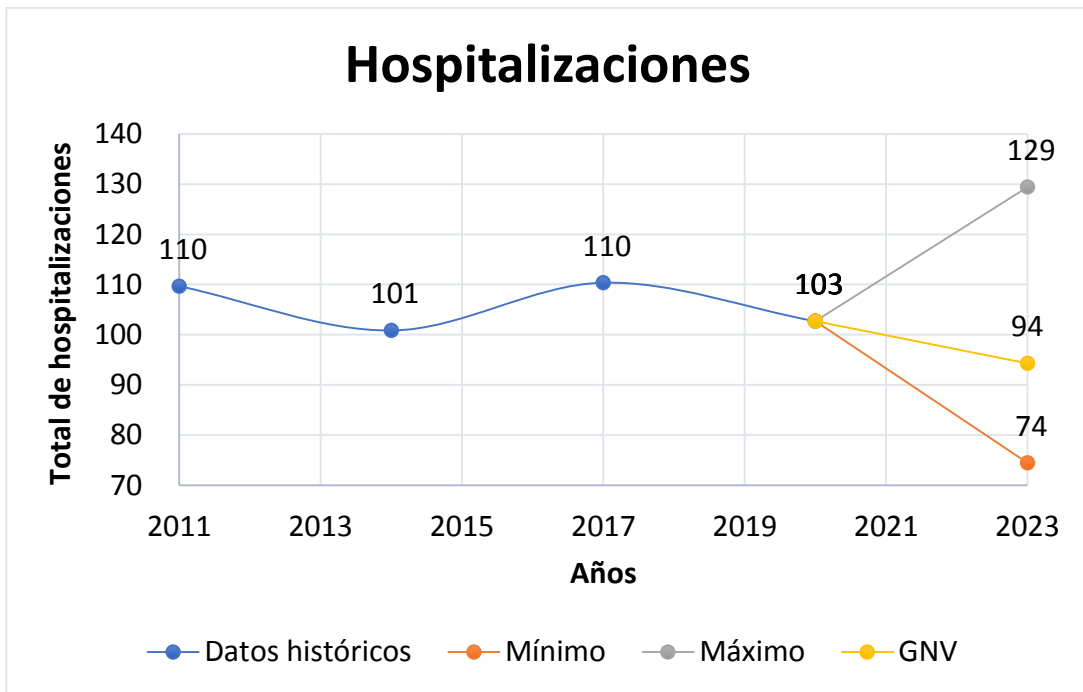


Figura 7. Proyección de hospitalizaciones del escenario 1.

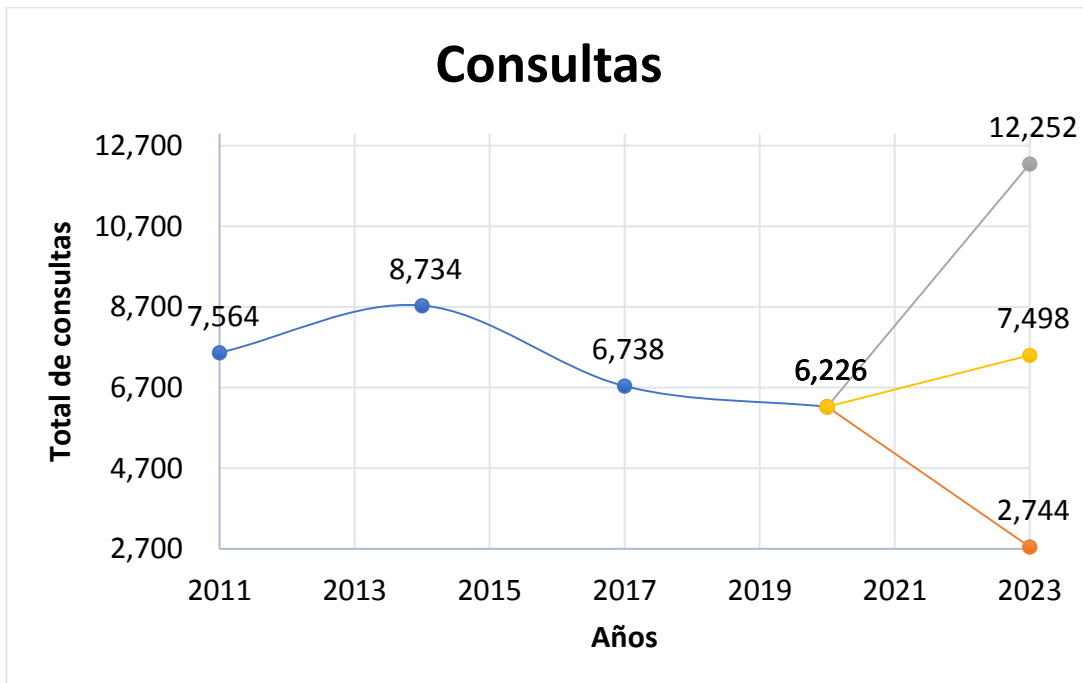


Figura 8. Proyección de consultas del escenario 1.

4.1.1.2 Escenario dos.

En cuanto al escenario dos, para muertes prematuras se observa un aumento del 16% en la proyección máxima y una disminución del 20% en caso de migrar a GNV; esto se muestra en la Figura 8.

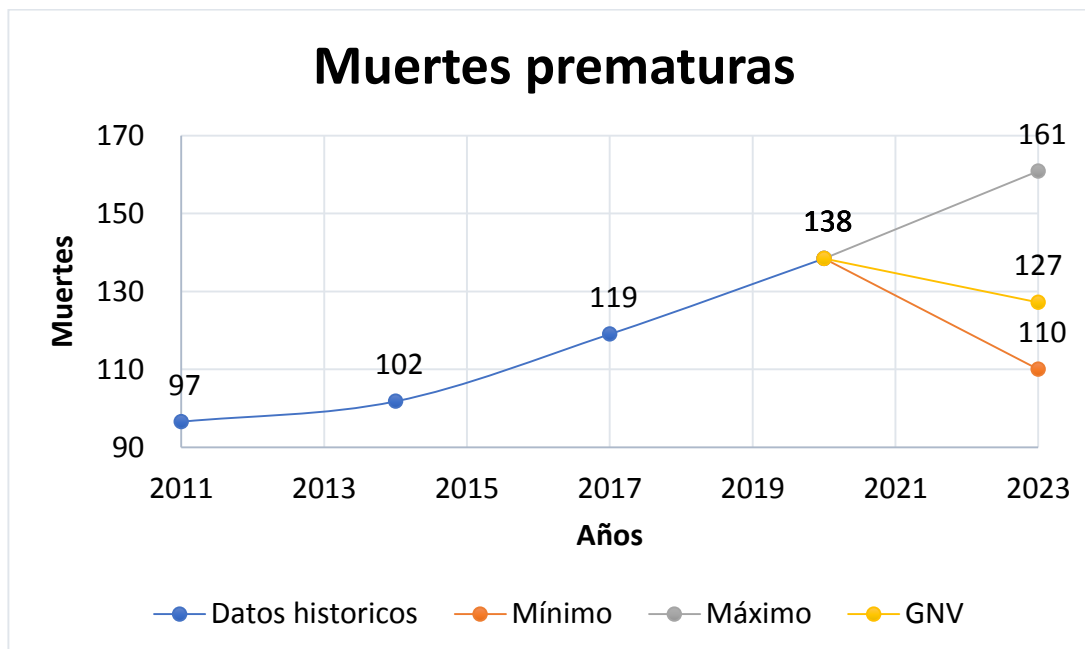


Figura 9. Proyección de muertes prematuras (escenario dos)

En la Figura 9, se muestra un aumento de 16% para la proyección máxima y una disminución de 8% en caso de cambiar a GNV en cuanto a hospitalizaciones.

Finalmente, en la Figura 10 se muestra que el número de consultas tendría un incremento de 95% en proyección máxima y una disminución de 8% para el caso del GNV.

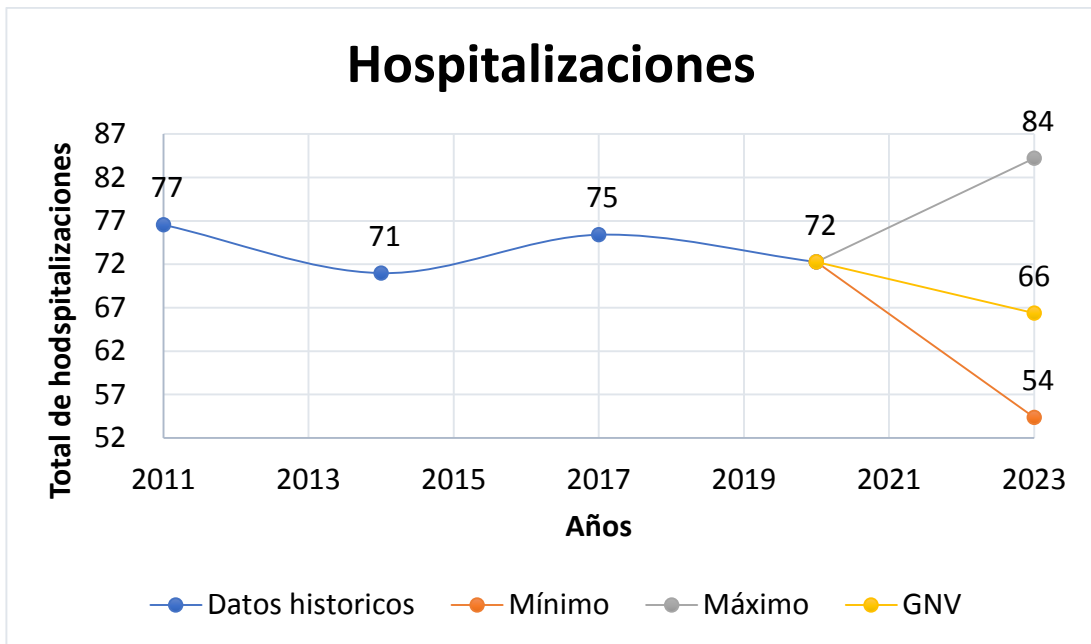


Figura 10. Proyección de hospitalizaciones en escenario dos

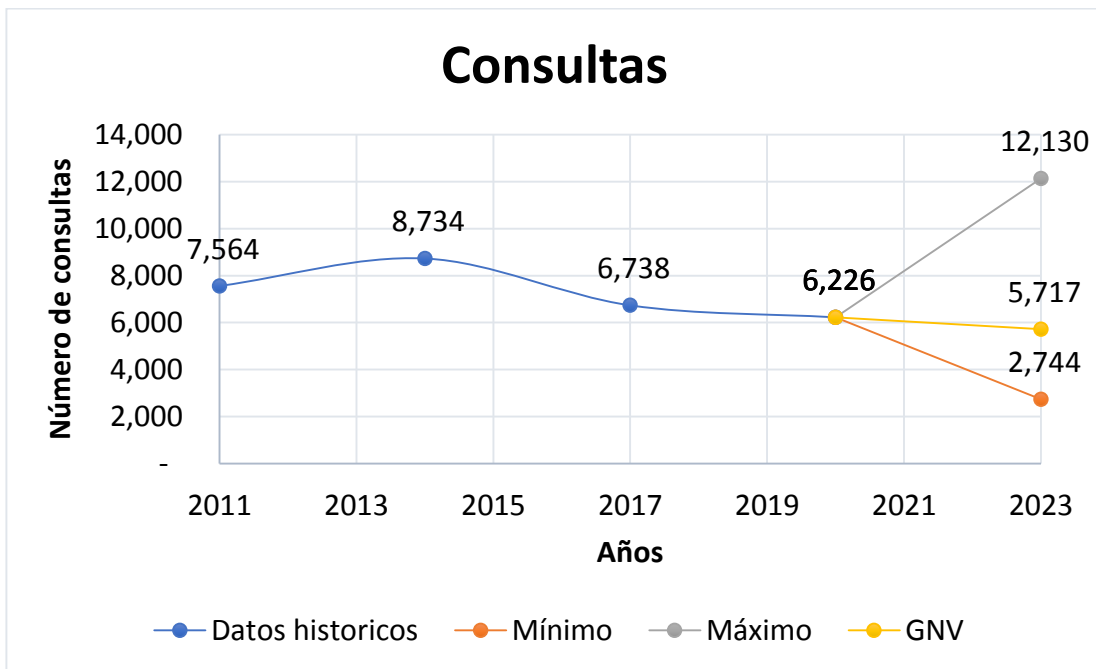


Figura 11. Proyección de consultas en escenario dos.

4.2 Impacto económico

4.2.1 Costos hospitalarios.

Para calcular los costos en salud se siguieron los siguientes pasos:

1. Se obtuvo H_{AT} por padecimiento y se multiplicó por el número de días de hospitalización promedio por padecimiento por el costo diario de hospitalización para la población asegurada.
2. Se repitió el paso anterior, pero esta vez se aplicó para la población no asegurada.

Al final se sumó el total de los costos en salud por hospitalizaciones.

4.2.2 Impacto económico por pérdida de productividad

4.2.2.1 Pérdida de productividad por muertes prematuras.

En este caso, se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Se dividió a las muertes por grupo de edad.
- 2) Se identificó el remanente de los años de vida productiva (la cual empieza a los 15 años y termina a los 65 años) para cada grupo de edad. Por ejemplo, 3% de las muertes corresponden al grupo de 20-24 años (edad promedio: 22), lo que implica que a este grupo le quedaban 43 años de vida productiva.
- 3) Se multiplicaron estos años por el salario anual con base en los datos antes proporcionados.
- 4) Se sumó la pérdida en productividad para todos los grupos de edad.

4.2.2.2 Pérdida de productividad por ausentismo laboral

Para calcular las pérdidas en productividad por ausentismo laboral se implementaron los siguientes pasos.

1. Se multiplicó EAT por el número de días de hospitalización promedio por padecimiento por el salario diario.

2. Se consideró un día laboral perdido para acudir a consulta, multiplicando CAT por el salario diario.
3. El 7% de la población corresponde a menores de 15 años, por lo que se consideró que en 50% de los casos, alguno de los padres debe faltar a trabajar para cuidar al hijo o familiar.

4.2.3 Impacto económico por consumo de combustible

Para calcular las pérdidas en productividad por ausentismo laboral se implementaron los siguientes pasos.

1. Se multiplicó E_{AT} por el número de días de hospitalización promedio por padecimiento por el salario diario.
2. Se consideró un día laboral perdido para acudir a consulta, multiplicando C_{AT} por el salario diario.
3. El 7% de la población corresponde a menores de 15 años, por lo que se consideró que en 50% de los casos, alguno de los padres debe faltar a trabajar para cuidar al hijo o familiar.

4.2.4 Resultados del impacto económico

Como primer punto se calcularon los gastos actuales, incluyendo los puntos antes mencionados, gastos en salud, pérdida de productividad y consumo de combustible, para los dos escenarios. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de impacto económico

	Escenario 1			
	Gastos en salud	Pérdidas en productividad	Consumo de combustible	Total
Escenario 2020	\$10,204,377.35	\$30,510,904.50	\$2,302,121,952.00	\$2,342,837,233.85
Escenarios futuros	\$9,370,609.49	\$28,017,953.61	\$1,101,695,886.72	\$1,139,084,449.82
Reducción	\$833,767.86	\$2,492,950.89	\$1,200,426,065.28	\$1,203,752,784.03
	Escenario 2			
	Gastos en salud	Pérdidas en productividad	Consumo de combustible	Total
Escenario 2020	\$8,654,396.26	\$45,737,189.24	\$2,302,121,952.00	\$2,356,513,537.50
Escenarios futuros	\$7,947,272.52	\$42,000,146.10	\$1,101,695,886.72	\$1,151,643,305.34
Reducción	707,124	3,737,043	1,200,426,065	1,204,870,232

4.2.4 Proyección de impacto económico.

Para el escenario uno se obtuvieron las siguientes proyecciones del impacto económico al año 2023.

En la Figura 11 se observa que para 2023 habría un 25% más de costos por contaminación y un aumento de 3.4% en caso de migrar al GNV.



Figura 12. Proyección de impacto económico en escenario uno.

Por otro lado, la Figura 12 muestra que el aumento en proyección máxima de igual manera sería de 25% y de 1.6% para migración de GNV.



Figura 13. Proyección de impacto económico en escenario dos.

5. Impacto ambiental

Como punto inicial, se estableció un recorrido promedio en 315 km diarios. De esta manera con base en la metodología teórica, la búsqueda literaria y en el caso de estudio podemos ver reducciones importantes. Estos resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de impacto ambiental

	Unidades	Escenario uno	Escenario dos
Escenario 2020	t CO ₂ /año	256,675	256,675
Escenarios futuros	t CO ₂ /año	32,084	220,740
Reducción	t CO₂/año	224,590	35,934

En la Figura 13 se muestra la proyección de emisiones de CO₂ a 2023, en la cual se puede observar un aumento de 8% para la proyección máxima. En el caso hipotético que se permutara de gasolina a GNV, para 2023 tendríamos una disminución de 14% con respecto al año 2020.

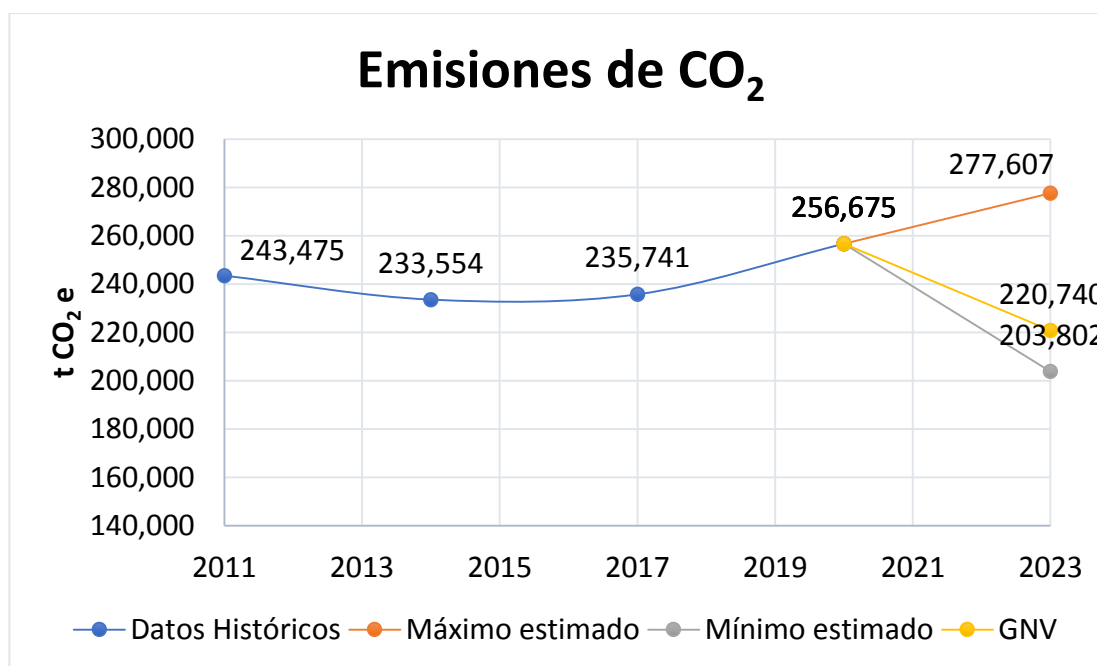


Figura 14. Proyección de impacto ambiental

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se han evaluado las emisiones que genera la sustitución de combustible para el sector transporte público sin itinerario fijo en la zona metropolitana de Cuernavaca, y se comprobó que se puede obtener una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero mejorando la sustentabilidad en términos energéticos, sociales y ambientales.

El análisis y caracterización del transporte público sin itinerario fijo de la zona metropolitana de la ciudad de Cuernavaca, arrojó como resultado:

La evaluación de las emisiones actualmente es de 257,829 toneladas de CO₂ y una sustitución para el escenario analizado en la que 12,735 vehículos sustituyeran su combustible por gas natural, se disminuyó 35,934 toneladas de CO₂ en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, México.

A causa de la contaminación del combustible mata de 91 a 138 personas al año en la zona metropolitana de la ciudad de Cuernavaca; con base en los dos escenarios analizados podríamos evitar entre 7 y 11 muertes anuales.

A partir de los impactos anteriores se determinó que la contaminación nos cuesta en torno a 50 millones de pesos anuales, con el cambio de combustible a GNV en el transporte público sin itinerario fijo se puede ver reducida esa cantidad 4 millones de pesos anuales.

Al mismo tiempo se gasta 2.3 billones de pesos anuales en consumo de combustible y al marco de cambiar el combustible habitual por GNV se podría ver reducida esa suma en 1.2 billones de pesos anuales.

En mi opinión y con base en los resultados, cualquier proyecto en el que se puedan evitar muertes es deseable. Ahora, si al mismo tiempo se puede ahorrar dinero federal, es el gancho para persuadir al gobierno de esta

instancia. Y por último se ve beneficiado el usuario final, por lo tanto, es muy factible que se dé este tipo de cambio.

5.2 Recomendaciones

Siempre se desea mejorar cualquier proyecto; por lo tanto, se les recomienda a los estudiantes que tengan interés en el tema de este proyecto o uno relacionado:

- Insistir en la obtención de información en especial el padrón vehicular de la zona que se va a analizar, tanto del transporte público sin itinerario fijo (taxis) como de distintas plataformas que prestan un servicio similar (Uber y Cabify), para contar con la cantidad, tipo y modelo de los vehículos en circulación, de esta manera contar un punto de partida sólido para una proyección.
- Hacer un apartado experimental sobre el comparativo de los combustibles en vehículos similares, para analizar así el comportamiento de ambos en situaciones cotidianas.

Referencias

- Arzate, E. (2016). *Forbes*. Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/convertir-los-vehiculos-gas-bueno-ambiente-bolsillo/> (Fecha de consulta: Abril de 2019)
- Avella-Moreno, E. (2012). Biocombustibles, Promisión o Falacia. *Momento*, 35-48.
- Bach, C., Lämmle, C., Bill, R., Soltic, P., Dyntar, D., Janner, P., & Seel, O. (2004). Clean engine vehicle a natural gas driven Euro-4/SULEV with 30% reduced CO₂-emissions. *SAE Technical paper*.
- Banxico. (2020). Obtenido de <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=inf&idioma=sp> (Fecha de consulta: Mayo de 2020)
- BP. (2020). Obtenido de https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es_es/spain/home/pdfs/fichas-seguridad/ssp2104.pdf (Fecha de consulta: Febrero de 2021)
- Campos Méndez, J., Quevedo, S., & Pilar, M. (2010). El transporte en la sociedad del siglo XXI: política de transporte europea y española.
- Chen, Z., Wang, L., & Zeng, K. (2019). A comparative study on the combustion and emissions of dual-fuel engine fueled with natural gas/methanol, natural gas/ethanol, and natural gas/n-butanol. *Energy Conversion and Management*, 11-19.
- Chiodi, M., Ferrari, A., Mack, O., Bargende, M., & Wichelhaus, D. (2011). A Way Towards Remarkable Reduction of CO₂-Emissions in Motorsports: The CNG-Engine. *SAE Technical paper*.

- Choudhury, A. H., Gordian, M. E., & Morris, S. S. (1997). Associations between respiratory illness and PM10 air. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 113-117.
- CONAPO. (2020). Obtenido de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index_2.html (Fecha de consulta: Febrero de 2020)
- CONUEE. (2016). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190837/Gas_Natural_Comprimido.pdf (Fecha de consulta: Febrero de 2019)
- Deloitte. (2019). Obtenido de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/finance/2019/Gas-Natural-en-Mexico.pdf> (Fecha de consulta: Marzo de 2019)
- Díaz, R. (2017). Vehículos de combustible alternativo para la Ciudad de México mediante matrices de decisiones. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ding, Y., Chai, Q., Han, W., Yang, S., & Shen, W. (2013). Coal-based synthetic natural gas (SNG): A solution to China's energy security and CO2 reduction? *Energy Policy*, 445-453.
- Dong, Y., & Steinberg, M. (1997). Hynol—an economical process for methanol production from biomass and natural gas with reduced CO2 emission. *International Journal of Hydrogen Energy*, 971-997.
- Forbes Staff. (2019). Así es como la contaminación del aire daña cada parte de tu cuerpo. *Forbes*.
- Forbes Staff. (2019). *Forbes*. Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/contaminacion-ambiental-dana-cada-celula-del-cuerpo-halla-investigacion/> (Fecha de consulta: Octubre de 2019)

- Gómez, F. G. (2014). Uso de energías alternativas como reemplazo de los combustibles tradicionales en vehículos de transporte y particulares en la Argentina (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas.).
- HRAEB. (2018). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/promedio-de-dias-de-estancia> (Fecha de consulta: Marzo de 2020)
- IEA. (2018). Obtenido de <https://www.iea.org/sankey/#?c=Mexico&s=Balance> (Fecha de consulta: Febrero de 2019)
- IEA. (2019). Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/> (Fecha de consulta: Abril de 2020)
- IMCO. (2013). Obtenido de https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2013/09/Fichas_por_ciudad_completo.pdf (Fecha de consulta: Febrero de 2020)
- IMCO. (2013). Obtenido de <http://imco.org.mx/calculadora-aire/> (Fecha de consulta: Febrero de 2020)
- IMSS. (2019). Obtenido de <http://www.imss.gob.mx/tramites/imss01002> (Fecha de consulta: Abril de 2020)
- INECC. (2014). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf (Fecha de consulta: Febrero de 2021)
- INECC. (2016). *Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208105/INECC_CAM_E_Final_14022017.pdf (Fecha de consulta: Marzo de 2020)

- INECC. (2020). Obtenido de <https://sinaica.inecc.gob.mx/estacion.php?estId=134>
- INEGI. (2015). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/derechohabiencia/> (Fecha de consulta: Marzo de 2020)
- INEGI. (2015). *Cuentame*. Obtenido de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mor/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=17 (Fecha de consulta: Marzo de 2020)
- INEGI. (2018). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est> (Fecha de consulta: Octubre de 2019)
- INEGI. (2019). Obtenido de https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos (Fecha de consulta: Febrero de 2020)
- Ishii, J., Osuga, M., Okada, T., Miyazaki, H., Koseki, M., & Tanikoshi, K. (2008). Reduction of CO2 emissions for automotive systems. *Hitachi Review*, 185.
- Khan, M. I., Yasmin, T., & Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 785-797.
- Kroher, T. (2019). *ADAC*. Obtenido de <https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/verkehr/elektroautos-mit-schwerem-klima-rucksack-unterwegs.html> (Fecha de consulta: Noviembre de 2019)
- Lastiri, X. (2018). *T* 21. Obtenido de <http://t21.com.mx/general/2018/04/24/gaseros-mexicanos-se-unen->

nueva-asociacionHualpa Antezana, R. (Fecha de consulta: Octubre de 2019)

Le Tertre, A., Medina, S., Samoli, E., Forsberg, B., Michelozzi, P., Boumghar, A., . . . Karsouyanni, K. (2002). Short-term effects of particulate air pollution on. *Epidemiol Community Health*, 773-9.

Ma, L., Geng, J., Li, W., Liu, P., & Li, Z. (2013). The development of natural gas as an automotive fuel in China. *Energy policy*, 531-539.

Mendoza, V. (2015). *Transporte México*. Obtenido de <https://www.transporte.mx/la-importancia-del-transporte-en-la-economia/> (Fecha de consulta: Septiembre de 2019)

Miranda, P. (2017). *IMSS publica costos de atención para quienes no son derechohabientes*. Obtenido de <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/nacion/sociedad/2017/03/21/imss-publica-costos-de-atencion-para-quienes-no-son> (Fecha de consulta: Abril de 2020)

Montiel, J. M. (2009). Antecedentes y situación actual de las estaciones de servicio en el municipio de Ahuachapán.

Mosquera, J. D., Fernandez Heao, S., & Mosquera M., J. C. (2010). Análisis de emisiones de CO2 para diferentes combustibles en la población de taxis en Pereira y Dosquebradas. *Scientia et Technica*, 141-146.

National Geographic. (2019). Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/mas-del-90-poblacion-mundial-respira-aire-contaminado_10734 (Fecha de consulta: Octubre de 2019)

Naturgy. (2020). Obtenido de file:///C:/Users/j.johnson/Downloads/ficha_datos_de_seguridad_gas_natural.pdf (Fecha de consulta: Febrero de 2021)

OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS*.

Ortiz Mateo, M. (2010). Reducción de las emisiones de CO₂ en vehículos de transporte: combustibles alternativos. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, 28-33.

PEMEX. (2015). Obtenido de <https://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/gas/HDS%20SAC%20Gas%20Natural%20TRI-9%20v1.1.pdf> (Fecha de consulta: Febrero de 2021)

Petroleum Intelligence. (2020). Obtenido de <https://petroleumintelligence.com/precios-de-la-gasolina-y-diesel-hoy.php> (Fecha de consulta: Octubre de 2020)

Pietrzak, K., & Pietrzak, O. (2020). Environmental effects of electromobility in a sustainable urban public transport. *Sustainability*.

Pourkhesalian, A. M., Shamekhi, A. H., & Salimi, F. (2010). Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics. *Fuel*, 1056-1063.

Quiñones, L. (2019). *News ONU*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2019/10/1464591> (Fecha de consulta: Marzo de 2020)

Ravindra, K., Wauters, E., Tyagi, S. K., & Van Grieken, R. (2006). Assessment of air quality after the implementation of compressed natural gas (CNG) as fuel in public transport in Delhi, India. . *Environmental monitoring and assessment*, 405-417.

Repsol. (2016). Obtenido de https://www.repsol.pe/imagenes/repsolporpe/es/GASOLINA95_tcm76-83274.pdf (Fecha de consulta: Febrero de 2021)

- Reyes, O., Escalante, R., & Matas, A. (2010). La demanda de gasolinas en México: Efectos y alternativas ante el cambio climático. . *Economía: teoría y práctica*, 83-111.
- Riojas, H., Álamo, U., Texcalac, J. L., & Romieu, I. (2012). Evaluación de impacto en salud por exposición a ozono y material particulado (PM10) en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Gobierno del Distrito Federal, Instituto Nacional de Salud Pública, Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal*.
- Rivera, M. A. (2007). Obtenido de <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567979> (Fecha de consulta: Febrero de 2021)
- Romieu, I., Gouveia, N., Cifuentes, L., Ponce de Leon, A., Junger, W., Miranda-Soberanis, V., . . . Solis, P. (2012). Multicity Study of Air Pollution and Health Effects in Latin America. *HEI Research Report Boston, MA: Health Effects Institute*.
- Rosales-Castillo, J. A., Torres-Meza, V. M., Olaiz-Fernández, G., & Borja-Aburto, V. H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población de estudios epidemiológicos. *Salud Pública Mex*, 544-555.
- Secretaría de desarrollo sustentable. (2020). Obtenido de <https://sustentable.morelos.gob.mx/dm> (Fecha de consulta: Marzo de 2020)
- Secretaría de Salud. (2018). *Dirección General de Información en Salud*. Obtenido de DGIS: <http://sinaiscap.salud.gob.mx:8080/DGIS/> (Fecha de consulta: Abril de 2020)
- Secretaría de Salud. (2019). *Boletín epidemiológico, Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica*.

- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (s.f.). *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. Ciudad de México. Septiembre, 2018.
- Secretaria del Trabajo. (2020). *Gobierno de Mexico*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/518682/Bolet_n_022_2019.pdf (Fecha de consulta: Abril de 2020)
- SEGOB. (2019). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de DOF: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5554895&fecha=22/03/2019
- SEMARNAT. (2014). *Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos*.
- SEMARNAT. (2019). *ProAire*.
- SENER. (2018). *Prospectiva de Gas Natural 2018-2032*. Obtenido de https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PGN_18_32_F.pdf (Fecha de consulta: Marzo de 2021)
- SHCP. (2014). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/23409/oficio_tasa_social_de_descuento.pdf (Fecha de consulta: Marzo de 2020)
- Solís, A. (2017). *Forbes*. Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/gas-natural-puede-acabar-70-la-contaminacion-ambiental/> (Fecha de consulta: Septiembre de 2019)
- Stieb, D. M., Beveridge, R. C., Brook, J. R., Smith-Doiron, M., Burnett, R. T., Dales, R. E., . . . Mamedov, A. (2000). Air pollution, aeroallergens and cardiorespiratory emergency department visits in Saint John, Canada. *Exposure Anal. Environ. Epidemiol.* , 461-477.

Taboada Ibarra, E. L., & Osnaya García, S. G. (2009). El diesel para autotransporte en México. Situación actual y prospectiva. *El cotidiano*, 157.

Whitelegg, J. (2010). Transporte y economía: un planteamiento para el siglo XXI. *EKONOMIAZ. Revista vasca de Economía*, 128-147.

Yang , M., Kraft-Oliver, T., Yang, G. X., & Min, W. T. (1997). Compressed natural gas vehicles: motoring towards a cleaner Beijing. *Applied Energy*, 395-405.