



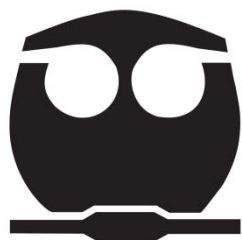
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DEL BENEFICIO EN REDUCCIÓN DE
CASOS DE MORTALIDAD PREMATURA AL AÑO
2030 POR REDUCCIÓN DE AZUFRE EN GASOLINAS
Y DIESEL EN MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**



**PRESENTA
STEPHANY MEZA MALDONADO**

MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente: Dr. Néstor Noé López Castillo

Vocal: Dra. Luz María Lazcano Arriola

Secretario: Dr. José Agustín García Reynoso

1er. Suplente: Dra. Gema Luz Andraca Ayala

2do. Suplente: M. en C. Sergio Adrián García González

Sitio donde se desarrolló el tema:

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 04510

Asesor:

Dr. José Agustín García Reynoso

Sustentante:

Stephany Meza Maldonado

Índice

1. Introducción.....	5
2. Objetivo	6
3. Hipótesis.....	6
4. Descripción del método	6
5. Información relevante	7
5.1 Compuestos tóxicos emitidos al aire	8
5.1.1 Efectos perjudiciales de las partículas suspendidas	9
5.1.2 Efectos perjudiciales de los óxidos de azufre	10
5.2 Situación actual de la contaminación atmosférica en México	11
5.3 Emisión de contaminantes por fuentes móviles	12
5.4 Presiones regulatorias	14
5.5 Presencia de azufre en petróleo crudo y proceso de eliminación	14
5.6 Importancia de la reducción de azufre en combustibles para fuentes móviles	16
5.6.1 Vehículos a gasolina	18
5.6.2 Vehículos a Diesel	21
5.7 Calidad internacional de los combustibles fósiles	24
5.8 Consumo de combustibles vehiculares en México, calidad histórica	26
5.9 Contenido de azufre en gasolinas en México	28
5.10 Efectos de los contaminantes sobre el organismo	35
5.10.1 Efectos crónicos, agudos y subagudos.....	35
5.10.2 Efectos reversibles e irreversibles	35
5.10.3 Efectos locales, sistémicos y órgano blanco.....	35
5.11 Evaluación de beneficios	36
6. Resultados	40
7. Análisis de resultados	47
8. Conclusiones y recomendaciones.....	49
9. Referencias	51
10. Apéndices.....	55
10.1 Especificaciones de los productos de Pemex Refinación del año 2012.....	55

10.2 Especificaciones de presión de vapor y destilación para gasolinas	60
10.3 Protección contra el sello de vapor en gasolinas	61
10.4 Volatilidad de gasolinas por época del año.....	61
10.5 Zonas geográficas de distribución de gasolinas.....	62
10.6 Peso específico y azufre total de los productos de Pemex Refinación en el año 2012	63

1. Introducción

Las últimas décadas han sido caracterizadas por una preocupación social constante, debido a las emisiones de contaminantes y el riesgo que éstos representan para la salud humana y la conservación del ambiente.

La contaminación se ha convertido en un asunto que nos interesa a todos, ya que a cada aumento de sustancias tóxicas que se arrojan al ambiente corresponde un empeoramiento de las condiciones generales de vida. Si aumenta la contaminación atmosférica, por ejemplo, habrá cada vez más enfermedades pulmonares y, en general, una reducción en la esperanza de vida y, en la calidad de la misma.

La contaminación atmosférica se ha definido como la acumulación de sustancias en el aire en concentraciones tales que provocan daños en la salud de los seres vivos que habitan una región determinada, o en los bienes materiales existentes en dicha región.

Debido a las implicaciones para la salud y al medio ambiente que pueden derivarse de las alteraciones en la calidad del aire, éstas constituyen en la actualidad una importante preocupación, tanto a nivel local, regional y global.

Aunque las emisiones a la atmósfera se han visto disminuidas gracias a la concientización paulatina de la población, cada vez se hacen más visibles los cambios significativos en el clima y los impactos negativos debidos a los contaminantes atmosféricos en las regiones más vulnerables, por lo que la calidad del aire y su protección es una prioridad en las políticas ambientales de los distintos países.

Los contaminantes del aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Existen seis contaminantes criterio, y uno de ellos es el bióxido de azufre (SO_2). El bióxido de azufre emitido a la atmósfera proviene, en su mayoría, de fuentes antropogénicas, específicamente de la quema de combustibles derivados del petróleo.

Los productos derivados del petróleo, particularmente los combustibles, son parte esencial del desarrollo industrial. Sin embargo, se debe vigilar que el contenido de azufre en los combustibles se encuentre dentro de los límites permitidos por las regulaciones ambientales. Además de contaminar el aire, debido a la emisión de bióxido de azufre durante la combustión, el azufre presente en los combustibles fósiles envenena los convertidores catalíticos, y corroe partes de los motores de combustión interna.

El objetivo de este proyecto es calcular la disminución de muertes prematuras en el país al año 2030 para un escenario de disminución de contenido de azufre en gasolinas y Diesel hasta una categoría de "Ultra Bajo Azufre".

2. Objetivo

Calcular la disminución de muertes prematuras en el país al año 2030 para un escenario de disminución de contenido de azufre en gasolinas y Diesel hasta una categoría de “Ultra Bajo Azufre”.

3. Hipótesis

La reducción en el contenido de azufre en gasolinas y Diesel de su nivel actual al contenido de categoría “Ultra Bajo Azufre” representaría una disminución importante en la cantidad de muertes prematuras en el país al año 2030.

4. Descripción del método

1. Recopilación de datos de consumo de combustible. Se usó el “Balance Nacional de Energía 2012”, de la Secretaría de Energía (SENER) para determinar las cantidades empleadas durante ese año de cada tipo de combustible.

2. Recopilación de datos de peso específico y contenido de azufre para los combustibles producidos en el año 2012 por Petróleos Mexicanos (PEMEX).

3. Recopilación de especificaciones de contenido máximo de azufre para los combustibles producidos en el año 2012 por Pemex Refinación.

4. Cálculo del valor promedio ponderado anual para peso específico de los combustibles producidos en el año 2012 por Pemex Refinación.

5. Cálculo de emisión máxima de azufre en kilogramos para el año 2012 por cada tipo de combustible.

6. Cálculo del valor promedio ponderado anual para contenido de azufre de los combustibles producidos en el año 2012 por Pemex Refinación.

7. Cálculo de emisión promedio de azufre en kilogramos para el año 2012 por cada tipo de combustible.

8. Cálculo de emisión de azufre en kilogramos para los casos de estudio descritos en la tabla 1.

9. Cálculo del beneficio en reducción de muertes prematuras al año 2030 que se obtiene con cada caso de estudio, usando la hoja de cálculo “Benefits calculator_Mexico_v1.7”, bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de Diesel aumenta en un 2.9% al año en el periodo comprendido entre 2012 y 2030.
- El consumo de gasolina aumenta en un 3% al año en el periodo comprendido entre 2012 y 2030.
- El consumo de los demás tipos de combustibles permanece igual.

Tabla 1. Casos de estudio

Caso	Descripción
1	Toda la producción de gasolina Magna pasa a ser de categoría UBA, con un contenido de azufre de 30 ppm. El contenido de azufre del resto de los petrolíferos es igual al promedio ponderado que cada uno presentó en el año 2012.
2	Toda la producción de gasolina Magna pasa a ser de categoría UBA, con un contenido de azufre de 30 ppm, y toda la producción de Diesel pasa a la categoría UBA, con un contenido de azufre de 15 ppm. El contenido del resto de los petrolíferos es igual al promedio ponderado que cada uno presentó en el año 2012.
3	Contenido de azufre de toda la producción de gasolina Magna= 10 ppm; contenido de azufre de toda la producción de Diesel= 15 ppm. El contenido del resto de los petrolíferos es igual al promedio ponderado que cada uno presentó en el año 2012.

5. Información relevante

Las últimas décadas han sido caracterizadas por una preocupación social constante en las emisiones de contaminantes y el riesgo que éstos representan para la salud humana y la conservación del ambiente.

La contaminación se ha convertido en un asunto que nos interesa a todos, ya que a cada aumento de sustancias tóxicas que se arrojan al ambiente corresponde un empeoramiento de las condiciones generales de vida. Si aumenta la contaminación atmosférica, por ejemplo, habrá cada vez más enfermedades pulmonares, mayor incidencia de tumores cancerígenos y, en general, una reducción en la esperanza de vida.

Naturalmente, no se puede (ni se quiere) regresar a un mundo preindustrial, pero al mismo tiempo, es preciso rechazar la concesión, según la cual, la contaminación es el complemento necesario de la civilización industrial, las dos caras inevitables de la misma moneda. Sabemos ya que nuestras actividades económicas repercuten y modifican el entorno ecológico, y esto nos ha llevado a dar más importancia a los procesos de toma de decisiones, y a la inclusión del análisis de riesgo en dichos procesos.

La palabra riesgo se refiere al potencial de ocurrencia de consecuencias adversas, indeseables a la vida humana, salud o ambiente. La estimación del riesgo se basa en la probabilidad de la ocurrencia de un evento determinado y de la consecuencia esperada del mismo.

La fuente de un riesgo es el peligro o potencial de daño. La cuantificación de la consecuencia del peligro es el riesgo.

Un peligro se describe con referencia a una fuente emisora y la velocidad de emisión, que es la cantidad de un agente químico peligroso que se libera de una planta o actividad por unidad de tiempo.

Una vez que un agente químico peligroso es emitido, se transporta y se transforma. A través de diferentes caminos, las sustancias resultantes alcanzan y afectan al organismo blanco. La exposición de dicho organismo a las sustancias produce efectos adversos en la salud, desviaciones adversas a sus funciones normales y estas desviaciones y efectos son cuantificados como estimaciones del riesgo.

Exposición es la concentración de un agente químico en las vecindades de los puntos de entrada de un blanco que está expuesto, en relación a un periodo de tiempo determinado. La medición del riesgo se cuantifica usando un modelo con información de soporte y depende de la metodología de evaluación y de los datos. La metodología incluye consideraciones y modelos.

La evaluación de la afectación a la salud por parte de tóxicos presentes en el aire se centra actualmente en la probabilidad de cáncer en el tiempo de vida de un individuo y los índices de peligro a la salud como una medición primaria. La *probabilidad de cáncer en el tiempo de vida* (LCP por sus siglas en inglés) es el incremento en la probabilidad de un individuo de contraer cáncer debido a la exposición a la sustancia en estudio. El *Índice de peligro a la salud* es la medida de la significancia relativa a la exposición de un químico, y se calcula dividiendo el nivel de exposición con un nivel de referencia.

5.1 Compuestos tóxicos emitidos al aire

La contaminación atmosférica se ha definido como la acumulación en el aire de sustancias en concentraciones tales que provoquen daños en la salud de los seres vivos que habitan una región determinada, o en los bienes materiales existentes en dicha región.

Los contaminantes del aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Actualmente, el término “contaminantes criterio” ha sido adoptado en muchos países, y son:

- Bióxido de azufre (SO₂)
- Bióxido de nitrógeno (NO₂)
- Material Particulado (PM)
- Plomo (Pb)

- Monóxido de carbono (CO)
- Ozono (O₃)

Para cada contaminante criterio se han desarrollado guías y normas. Las guías son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Las normas establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un período definido, estos valores límite son diseñados con un margen de protección ante los riesgos y tienen la finalidad de proteger la salud humana y el medioambiente.

En México, el control de los seis contaminantes criterio antes mencionados se considera prioritario para la protección de la salud. Los límites permisibles para dichos contaminantes se establecen en las normas oficiales mexicanas emitidas por la Secretaría de Salud, en el Diario Oficial de la Federación.

Los efectos en la salud relacionados con la exposición a los compuestos tóxicos pueden variar ampliamente. Un efecto específico en la salud depende de la concentración del contaminante a la que se está expuesto, así como del tiempo de exposición.

Tabla 2. Contaminantes criterio y Normas oficiales mexicanas que establecen sus límites permisibles.

Contaminante	Norma Oficial Mexicana
Ozono	NOM-020-SSA1-2014
Monóxido de carbono	NOM-021-SSA1-1993
Óxidos de azufre	NOM-022-SSA1-2010
Óxidos de nitrógeno	NOM-023-SSA1-1993
Partículas suspendidas totales	NOM-025-SSA1-2014
Plomo	NOM-026-SSA1-1993

5.1.1 Efectos perjudiciales de las partículas suspendidas

Algunas partículas suspendidas, por su naturaleza química, pueden ejercer efectos nocivos sobre la salud humana, debido a que contienen elementos tóxicos como plomo y arsénico. Se conoce también, por ejemplo, que las nieblas de ácido sulfúrico, formado por la oxidación atmosférica del SO₂, ocasionan trastornos respiratorios en animales de experimentación.

Las partículas suspendidas afectan nocivamente la salud al penetrar a zonas pulmonares más profundas que los contaminantes gaseosos, transportando sustancias tóxicas que provocan irritación en las membranas. Muchas de estas sustancias son solubles en la capa acuosa que recubre las mucosas del tracto respiratorio.

5.1.2 Efectos perjudiciales de los óxidos de azufre

Los óxidos de azufre son emitidos principalmente como bióxido de azufre (SO₂). Se forman por la oxidación del azufre presente en los combustibles durante la combustión.

Los óxidos de azufre, en combinación con las partículas y la humedad del aire, producen los efectos más perjudiciales atribuidos a la contaminación atmosférica del aire.

En la tabla 3 se muestran los efectos sobre la salud humana causados por el dióxido de azufre.

Tabla 3. Efectos sobre la salud humana provocados por el dióxido de azufre.

Concentración	Efectos
0.037-0.092 ppm media anual	Puede haber, acompañadas por partículas a una concentración de 185 mg/m ³ , un aumento en la frecuencia de síntomas respiratorios y enfermedades pulmonares.
0.11-0.19 ppm media en 24 h	Con un bajo nivel de partículas, puede haber trastornos respiratorios en personas de edad mayor.
0.19 ppm, media	Puede haber un aumento en la mortalidad en 24 h con bajos niveles de partículas.
0.25 ppm, media en 24 h	Puede haber un aumento en la tasa diaria de mortalidad, acompañado por partículas a una concentración de 750 mg/m ³ , una marcada elevación en la tasa de morbilidad.
0.52 ppm, promedio en 24 h	Puede haber un aumento en la mortalidad, acompañado por la presencia de partículas; puede ocurrir un aumento en la tasa de mortalidad.

Fuente: "Saneamiento ambiental", Campos Gómez, Irene. EUNED, 2003, 248 pp.

Aunque para la mayoría de las personas el dióxido de azufre no es muy tóxico, sí tiene algunos efectos en su salud. Su efecto primario es en el tracto respiratorio, produciendo irritación y aumentando la resistencia al flujo de aire de las vías respiratorias, sobre todo en las personas con debilidad respiratoria y asmáticas sensibles. Por consiguiente, la exposición al gas puede aumentar el esfuerzo requerido para respirar. La secreción de mucosidad está también estimulada por la exposición al aire contaminado por dióxido de azufre.

El dióxido de azufre ha sido implicado, al menos parcialmente, en varios incidentes agudos de contaminación atmosférica. En diciembre de 1930, una inversión térmica atrapó productos de desecho de varias fuentes industriales en el valle del

río Meuse, en Bélgica, lo cual hizo que los niveles de dióxido de azufre alcanzaran concentraciones de 38 ppm. Aproximadamente 60 personas murieron en el incidente (Manahan, 2006).

5.2 Situación actual de la contaminación atmosférica en México

Los límites de contaminantes establecidos en las normas de calidad del aire se exceden con frecuencia en las principales zonas urbanas de México, ocasionando que la población esté expuesta a una calidad de aire no satisfactoria.

La tabla 4 muestra que más de 27 millones de personas en México están expuestas a concentraciones de contaminantes atmosféricos que exceden las normas de calidad del aire establecidas para proteger su salud.

Tabla 4. Principales zonas urbanas de México, número de días en que se exceden los límites de contaminantes y población potencialmente expuesta durante el año 2009

Zona Metropolitana	Población	Días fuera de norma			
		Ozono	PM ₁₀	NO ₂	PM _{2.5}
Valle de México (ZMVM)	17,786,983	179	48	1	6
Guadalajara (ZMG)	3,669,021	75	13	0	-
Monterrey (ZMM)	3,236,604	12	85	0	8
Cd. Juárez	1,218,817	0	54	-	-
Toluca (ZMT)	1,142,426	-	154	-	-
Total	27,053,851				

El uso del guión (-) se refiere a que esa información no está disponible porque no se monitorea ese contaminante o se obtuvo información insuficiente para calcular las concentraciones atmosféricas.

La disponibilidad de información por ciudad y contaminante es variable debido a que las redes de monitoreo no miden todas los mismos contaminantes.

El área responsable eliminó la información de las PM_{2.5} de la Zona Metropolitana de Guadalajara al percatarse que los equipos de monitoreo no fueron utilizados y configurados adecuadamente y por lo tanto se obtuvieron registros de dudosa certeza.

Fuente: SEMARNAT, 2013

Si bien las fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera son diversas, los inventarios de emisiones existentes en las diferentes zonas del país muestran una contribución significativa del sector transporte. En la tabla 5 se puede observar que en la ZMVM el sector transporte contribuye con la mayor parte de las emisiones de CO, NO_x, SO₂ y PM₂₅ (99, 84, 58 y 52% respectivamente), así como un porcentaje elevado de COV (SENER, INE y PEMEX Refinación, 2006).

Tabla 5. Contribución de fuentes móviles a emisión de contaminantes atmosféricos en las tres principales zonas metropolitanas de México.

Contaminante	Contribución de fuentes móviles a emisiones contaminantes (%)		
	ZMVM	ZMM	ZMG
SO ₂	58	8	30
CO	99	99	99
NO _x	84	64	91
HC	Nd	66	57
PM ₁₀	19	Nd	Nd
PM ₂₅	52	Nd	Nd
COT	29	Nd	Nd
COV	38	Nd	Nd

COT= Compuestos orgánicos totales

COV= Compuestos orgánicos volátiles

Nd= No disponible

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

En general, los automóviles particulares que utilizan gasolina contribuyen con la mayoría de las emisiones de estos contaminantes; la excepción la constituyen las partículas suspendidas primarias, emitidas mayoritariamente por vehículos que utilizan Diesel. Estos datos son congruentes con las cifras de consumo de combustible reportadas por la Secretaría de Energía (SENER, 2013), que muestran que el sector transporte consume alrededor del 63% del total de combustible en el ámbito nacional.

En la ZMVM, las emisiones vehiculares se han reducido durante los últimos años, en gran parte gracias a la aplicación de programas como “Hoy no circula” y el de verificación vehicular. No obstante, con el crecimiento continuo de la flota vehicular se prevé que las emisiones de este sector aumenten, aún con las tecnologías de control de emisiones actuales. Se estima que en todo el país, el parque vehicular de autos ha aumentado desde el año 2000 en más de 45%. En febrero de 2005 llegó a 14.8 millones de unidades. Asimismo, el número de vehículos a Diesel de carga y de pasajeros ha crecido 59%, y llegó a las 7.2 millones de unidades en 2005. Se espera que en los próximos años la flota vehicular se duplique, y que con ello las emisiones de SO₂ y NO_x se incrementen en aproximadamente 50 y 20%, respectivamente (SEMARNAT, INE y PEMEX Refinación, 2006).

5.3 Emisión de contaminantes por fuentes móviles

Los vehículos automotores continúan siendo la fuente principal de contaminación del aire, a pesar de los enormes avances en las tecnologías de motorización y control de la contaminación. En los países industrializados, a medida que vehículos nuevos y más limpios reemplazan a los más viejos, las emisiones totales del sector transporte empiezan a declinar, sin que hayan dejado de ser la fuente más importante de contaminación atmosférica. En los países en desarrollo, en cambio, el número de vehículos está creciendo exponencialmente, como se

muestra en la figura 1, y en ausencia de normas estrictas de control, las emisiones de las fuentes móviles se están convirtiendo en una preocupación urgente.

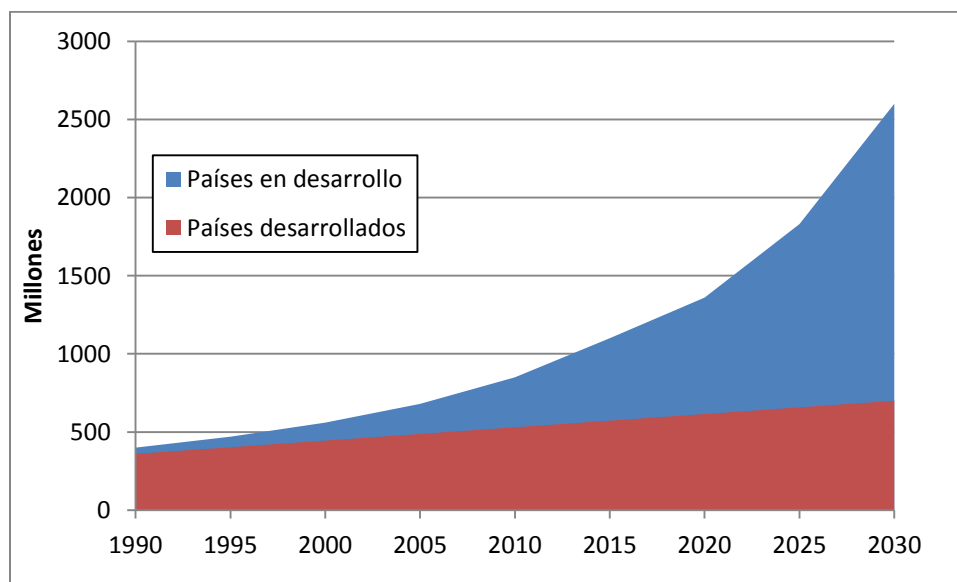


Figura 1. Número proyectado de automóviles.

Fuente: Blumberg, Walsh y Pera, *Gasolina y Diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*, 2003.

En el caso de América Latina, el desarrollo urbano y la creciente industrialización registrados en las últimas décadas hicieron que la calidad del aire se convirtiera en un tema de gran importancia, ya que, según se estimó, las emisiones vehiculares generaron entre 70 y 80% de la contaminación atmosférica, y gran parte se concentró en las ciudades densamente pobladas.

Los automotores son una fuente significativa de emisiones de CO, HC y PM, gran parte de las cuales son resultado de una combustión ineficiente o incompleta. Adicionalmente, los automotores son una de las fuentes más importantes de NO_x, que junto con los HC, son los precursores esenciales del ozono troposférico (O₃), el principal componente del smog fotoquímico. Todos estos contaminantes convencionales tienen importancia local y global por sus efectos sobre la salud humana y sus impactos ambientales. Los vehículos también son una fuente importante y creciente de bióxido de carbono (CO₂), el más importante de los gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen al calentamiento global.

La alerta mundial ante la emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes móviles fomentó que las agencias de protección ambiental, principalmente las de países industrializados, emitieran normatividad en materia de preservación del ambiente, para, al mismo tiempo, darle sustentabilidad al desarrollo.

Las acciones y desarrollos innovadores en este rubro han llevado a los fabricantes de motores de combustión interna a integrar tecnologías que permitan reducir la emisión de contaminantes mediante el control óptimo de la combustión y la limpieza de los gases residuales. Ante ello, la industria de la refinación ha contribuido con el diseño de combustibles orientados a soportar el desarrollo de la industria automotriz y a contribuir de esta manera con el cuidado del ambiente.

En un trabajo realizado por diversas asociaciones de armadores de automóviles (Alliance y EMA de Estados Unidos de América, JAMA de Japón y EAMA de Europa) se establecen cuatro categorías de calidad de la gasolina, donde la categoría 1 se refiere a los mercados en que no hay restricciones sobre emisiones; a la categoría 4 corresponden mercados con regulaciones ambientales muy estrictas. En Japón, algunos países de Europa y la costa oeste de Estados Unidos los programas intensivos en este sentido han dado buenos resultados y están en la categoría 3. Las gasolinas de categoría 1 tienen en promedio 1000 ppm de azufre; las de categoría 2, 200 ppm; las de categoría 3, 30 ppm, y las de categoría 4 de 5 a 10 ppm.

5.4 Presiones regulatorias

La Unión Europea, los Estados Unidos y otros países industrializados han luchado por mantener el paso del control del aire mediante controles cada vez más estrictos de las emisiones. Primero los vehículos de pasajeros, y luego también los vehículos de carga han sido sujetos a límites de emisión cada vez más estrictos. Recientemente, las agencias reguladoras han empezado a ocuparse de otros vehículos, como los utilizados en la construcción y en la agricultura. Algunas normas de emisiones, como las europeas y japonesas, distinguen entre vehículos a gasolina y Diesel, permitiendo a los vehículos a Diesel emitir cantidades superiores de NO_x y PM, y a los vehículos a gasolina emitir cantidades superiores de CO y HC.

Inicialmente, los productores de vehículos pudieron cumplir con las normas de emisión utilizando convertidores catalíticos simples en vehículos a gasolina y mejoras en el motor de los vehículos a Diesel. Se busca ahora que el desarrollo tecnológico se enfoque en motores más eficientes que reduzcan el consumo de combustibles.

5.5 Presencia de azufre en petróleo crudo y proceso de eliminación

Como puede verse en la tabla 6, el contenido promedio de azufre en el crudo que se ofrece en todo el mundo es de 100 a 33000 ppm (Fredriksson, 2000), y los niveles de azufre dentro de una fuente de abastecimiento pueden variar mucho en función de la densidad. Las refinerías están generalmente construidas para procesar tanto el petróleo “dulce” de sobreprecio, con bajo contenido de azufre, como el petróleo “amargo” con alto contenido de azufre.

Tabla 6. Rangos de contenidos de azufre en petróleo crudo.

Región	Valores Promedio de Contenido de Azufre (% peso)	Valor máximo (% peso)	Valor mínimo (% peso)
Medio Oriente	0.8-2.3	3.3	0.1
África	0.1-0.3	2.1	0.1
Asia	0.1-0.2	1.0	0.02
Países de la Ex-Unión Soviética	0.2-1.2	1.2	0.01
Europa	0.28-0.5	1.3	0.14
Norteamérica	0.2-1.1	1.1	0.20
Latinoamérica	0.8-2.5	3.3	0.50

Fuente: IPCC, 2000.

Los tipos de compuestos de azufre dentro del petróleo crudo también varían mucho. La remoción del azufre se facilita cuando los átomos de este elemento son accesibles. El azufre unido a cadenas lineales o de anillo simple de hidrocarburos es más fácil de separar. Cuando el azufre está unido con hidrocarburos aromáticos, especialmente con grupos adicionales unidos en cualquiera de los lados, el contacto entre el átomo de azufre y el catalizador se ve físicamente impedido por el contorno de la molécula.

Cuando el petróleo crudo entra a la refinería, es separado en diversas fracciones de acuerdo con los diferentes rangos de ebullición de éstas, mediante destilación. La gasolina y el Diesel, en su mayoría, son producidos a través de la separación directa de la fracción del petróleo crudo que se ajusta naturalmente a los rangos apropiados de ebullición para estos combustibles. La fracción líquida más ligera, la nafta, se usa para la producción de gasolina. La siguiente fracción, los destilados, están dentro del rango apropiado para el Diesel y la turbosina.

Conforme aumenta la densidad de la fracción del crudo, los compuestos de azufre son más abundantes y la dificultad para removerlos aumenta. Las porciones más pesadas del crudo son divididas, a través de unidades de cracking de fluido catalítico (fluid catalytic cracking, FCC), en compuestos más pequeños y ligeros para así producir más gasolina y Diesel.

La unidad de cracking de fluido catalítico es la fase de procesamiento responsable de introducir la mayor parte del azufre a la gasolina y una amplia proporción de los compuestos de azufre obstaculizado al Diesel. Estas porciones craqueadas de los combustibles contribuyen con el 30-50% de la producción de la gasolina en la mayoría de las refinerías, pero son responsables de más del 90% del contenido de azufre (Blumberg *et al*, 2003).

El hidrotratamiento es la tecnología más comúnmente usada en las refinerías para remover el azufre de los fluidos de abastecimiento para la producción de gasolina y Diesel. El hidrotratamiento consiste en la adición de hidrógeno para apoyar la remoción del azufre. Este proceso tiende a mejorar la calidad del Diesel aumentando el número de cetano, y a disminuir la calidad de la gasolina al bajar el

número de octano. Las refinerías pueden tratar todo el abastecimiento de la unidad de cracking catalítico FCC, reduciendo al mismo tiempo tanto el contenido de azufre de los fluidos de alimentación para el Diesel como para la gasolina. Sin embargo, esto no es suficiente para alcanzar productos de bajo azufre y tiene un costo muy elevado, puesto que requiere volúmenes de reactor más grandes e insumos de hidrógeno y energía adicionales. El hidrotratamiento específico de los fluidos de alimentación para la producción de la gasolina y del Diesel es generalmente una solución de menor costo.

Una alternativa al hidrotratamiento es la adsorción. La adsorción de azufre es una tecnología que reduce los costos de remoción del azufre. Con este método, en lugar de la adición de hidrógeno, el azufre se remueve a través de un proceso químico de adsorción. En comparación a la adsorción, el hidrotratamiento de los fluidos de alimentación para obtener un producto de bajo azufre requiere tiempos de procesamiento más largos. La adsorción no requiere insumos sustanciales de hidrógeno y tiene lugar a temperaturas y presiones mucho más bajas que las tecnologías de hidrotratamiento y, por tanto, requieren de menor consumo energético. La adsorción de azufre reduce significativamente los costos de operación.

5.6 Importancia de la reducción de azufre en combustibles para fuentes móviles

Las primeras regulaciones sobre especificaciones de los combustibles fueron introducidas en Estados Unidos y Japón en la década de 1970. Estas regulaciones restringían el uso del plomo en ciertos combustibles. El plomo envenenaba las nuevas tecnologías catalíticas para el control del monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). La gasolina sin plomo fue necesaria para los convertidores catalíticos, instalados por primera vez en modelos del año 1975.

A la fecha, las políticas gubernamentales para prevenir el uso del plomo en combustibles ya han sido instrumentadas en la mayoría de los países y proveen enormes beneficios a la salud. Pero una vez aplicadas estas medidas de control sobre el plomo, se tiene un nuevo reto por delante: controlar el contenido de azufre.

El azufre es el plomo del nuevo siglo. Como el plomo, las emisiones de compuestos de azufre causan serios efectos adversos en la salud humana y el ambiente, e inhibe el uso de tecnologías avanzadas que tienen como objetivo disminuir las emisiones de otros contaminantes. Sin embargo, a diferencia del plomo, que es un aditivo del combustible, el azufre se encuentra naturalmente en el petróleo crudo.

De la misma manera que los combustibles sin plomo, los combustibles de ultra bajo azufre representan una nueva herramienta para generar emisiones más limpias, mejorando así la salud pública y reduciendo los problemas ambientales.

Los niveles de azufre en los combustibles ya se han empezado a reducir y regular en muchas partes del mundo. Los beneficios presentes y futuros del uso de combustibles de bajo azufre e, incluso, ultra bajo azufre, son sustanciales y cada vez más necesarios en un mundo con un número creciente de vehículos y mayores promedios de distancia por viaje.

Es imposible reducir la contaminación del aire generada por el sector transporte sin eliminar el azufre de los combustibles. El azufre es, por sí mismo, un contaminante, pero más importante aún es que el azufre impide la adopción de las principales tecnologías para el control de la contaminación. Ninguna estrategia de reducción significativa de la contaminación del aire puede dar resultado sin reducir el azufre de los combustibles a niveles cercanos a cero.

El azufre impide el uso de muchas tecnologías convencionales y avanzadas para el control de contaminantes vehiculares, incluyendo monóxido de carbono (CO), partículas, óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos (HC). Los combustibles de bajo azufre son la clave para reducir las emisiones vehiculares mediante la introducción de tecnologías avanzadas de control y nuevos vehículos con diseños más eficientes.

El azufre se encuentra tanto en la gasolina como en el Diesel. Cuando estos combustibles son quemados, el azufre se emite como bióxido de azufre (SO₂) o como partículas de sulfatos. Cualquier reducción en el contenido de azufre en los combustibles disminuye las emisiones de estos compuestos y cuando este contenido disminuye más allá de cierto punto, el beneficio aumenta hasta una disminución importante de las emisiones totales de contaminantes.

Impacto del azufre sobre las emisiones vehiculares:

- Combustibles pobres en azufre (50 ppm- 150 ppm). Reducen las emisiones de CO, HC y NO_x de los vehículos a gasolina equipados con catalizadores, y las emisiones de PM de vehículos a Diesel, con o sin catalizadores de oxidación.
- Combustibles de bajo azufre (10 ppm-50 ppm). Permiten mayores beneficios al incorporar tecnologías avanzadas de control para vehículos Diesel. Los filtros de partículas del Diesel pueden usarse con combustibles de bajo azufre, pero sólo alcanzan un 50% de eficiencia de control, aproximadamente. La reducción catalítica selectiva puede aplicarse en este caso para lograr un control de emisiones de NO_x superior al 80%.
- Combustibles de ultra bajo azufre (menor de 10 ppm). Permiten el uso de equipo de absorción de NO_x, incrementando su control hasta niveles superiores al 90%, tanto en vehículos a Diesel como de gasolina. Los filtros de partículas alcanzan su máxima eficiencia con combustibles de ultra bajo azufre, cerca del 100% de reducción de PM.

La encuesta internacional sobre la calidad de la gasolina reportada por el IFQC (International Fuel Quality Center), en enero de 2008, reveló avances en el suministro de gasolinas con calidad UBA. Destacó el área de California con la

máxima calidad (30 ppm de azufre en promedio anual), seguida de Europa y Gran Bretaña, donde la calidad es variable (10-50 ppm de azufre), pero en la mayor parte de los Estados Unidos se mantuvo una concentración promedio de 80 ppm de azufre.

5.6.1 Vehículos a gasolina

La mayoría de los vehículos a gasolina actualmente en uso están equipados con catalizadores para el control de CO, HC y NO_x, los cuales son impactados por los niveles de azufre del combustible. El impacto del azufre es más severo conforme los vehículos están diseñados para alcanzar estándares más estrictos. Los niveles de azufre en el combustible son el obstáculo primario para introducir tecnologías más avanzadas de control de emisiones en el mercado y para el diseño de motores a gasolina más eficientes.

5.6.1.1 Catalizadores de tres vías actuales

En el mundo, 85% de los nuevos vehículos a gasolina están equipados con catalizadores de tres vías (three-way catalyst, TWC), equipo que disminuye simultáneamente las emisiones de CO, HC y NO_x.

Durante la combustión, el carbono presente en el combustible puede oxidarse mediante dos reacciones diferentes: puede oxidarse hasta formar CO₂, o sólo oxidarse hasta formar CO. El nitrógeno presente en el aire también se oxida durante la combustión, generando así los óxidos de nitrógeno (NO_x). Debido a la imposibilidad de controlar totalmente el proceso de la combustión, las tres reacciones de oxidación ocurren simultáneamente.

La reacción de formación de CO₂ es preferible a la formación de CO, tanto por la mayor liberación de energía que implica como por el hecho de que el CO₂ es una emisión menos dañina que el CO. La formación de CO₂ se ve favorecida por un mayor contenido de aire en la mezcla de combustión.

Para llevar a cabo una disminución efectiva de emisiones de CO, HC y NO_x, los vehículos con TWC deben operar con una relación aire/combustible muy exacta, permitiendo sólo el oxígeno que es teóricamente suficiente para oxidar completamente todo el carbono presente en el combustible. Si el motor opera con exceso de combustible en relación a la cantidad de aire (mezcla rica), aparecen hidrocarburos sin quemar (HC). Si opera con exceso de aire en relación a la cantidad de combustible (mezcla pobre) se generan óxidos de nitrógeno (NO_x). Se debe mantener una relación entre el volumen de aire y el combustible de 14.7 a 1, es decir, que el volumen de aire que ingresa sea aproximadamente 14,7 veces el volumen de combustible para que la emisión de CO, HC y NO_x se reduzca al mínimo. Los hidrocarburos (HC) y el monóxido de carbono (CO) antes de ser expulsados por el escape, son convertidos mediante los TWC en dióxido de carbono y vapor de agua. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son disociados en Nitrógeno molecular (N₂), principal constituyente de aire atmosférico, y oxígeno O₂.

Los niveles de azufre en el combustible impactan el funcionamiento de los TWC en las siguientes formas:

- El azufre del combustible reduce la eficiencia de conversión del CO, los HC y el NO_x. El azufre compite con estos gases por superficie de reacción en el catalizador. El azufre de la corriente de escape se acumula en el TWC durante las condiciones de manejo normales y se libera como SO₂ durante los periodos de funcionamiento ricos en combustible y de alta temperatura (por ejemplo, durante la aceleración a fondo del vehículo). Las reducciones en los niveles de azufre de la gasolina –desde niveles de 200-600 ppm hasta 18-50 ppm- han dado como resultado reducciones del 9-55% en las emisiones de HC y CO y del 8-77% en emisiones de NO_x, dependiendo de las tecnologías vehiculares y de las condiciones de manejo. La emisión de contaminantes baja bruscamente cuando el azufre se reduce por debajo de 200 ppm, y se reduce aún más pronunciadamente con niveles de azufre menores a 100 ppm (Blumberg *et al*, 2003).
- El contenido de azufre en el combustible contribuye al envejecimiento del catalizador. El azufre eleva la temperatura de light-off, que es la temperatura a la cual la conversión catalítica tiene lugar, produciendo un incremento de las emisiones de encendido frío.

Los beneficios de la reducción de azufre en los combustibles son mayores en los vehículos diseñados para cumplir normas de emisión más estrictas. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), realizó pruebas usando automóviles nuevos con un combustible estandarizado a 30 ppm de azufre y estimó incrementos variables de emisiones con el uso de combustibles comerciales de mayor contenido de azufre. Los resultados se muestran en la tabla 7. Puede observarse que el incremento de emisiones puede ser de hasta 13 veces para vehículos certificados como de “baja emisión”.

Tabla 7. Niveles de emisiones vehiculares con un incremento en el contenido de azufre en los combustibles de 30 a 330 ppm

	NO _x	HC
Incremento de emisiones en vehículos normales	8-10%	14-24%
Incremento de emisiones en vehículos de baja emisión	42-134%	24-40%

Fuente: Blumberg, Walsh y Pera, *Gasolina y Diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*, 2003.

Un objetivo para el mejoramiento de los TWC es tener la capacidad para acumular oxígeno. Esto podría permitir una oxidación eficiente de CO y HC durante los ciclos ricos en combustible, incluyendo periodos de pausa y aceleración. Los materiales efectivos de almacenamiento, que puedan soportar altas temperaturas de los catalizadores acoplados también requieren del uso de combustibles de bajo azufre.

5.6.1.2 Trampas de captura de NO_x

Los motores de mezcla pobre requieren tecnologías de postratamiento para el control de emisiones de NO_x. Las trampas de NO_x, que son la tecnología más eficiente para el control de NO_x en motores de mezcla pobre son impactadas mucho más severamente que los TWC por el azufre del combustible. Dado que los niveles elevados de azufre reducen la efectividad de las trampas y provocan

incrementos en el consumo del combustible, la gasolina UBA es el factor clave para incrementar la eficiencia de los vehículos a gasolina.

Los motores de mezcla pobre incrementan la relación aire-combustible y, por tanto, reducen el consumo de combustible. Los motores de mezcla pobre proveen un beneficio automático para el control de CO y HC, que se forman en cantidades menores y pueden ser fácilmente oxidados en la mezcla rica en oxígeno del escape. El reto está en el control de NO_x en un medio abundante en oxígeno. Las trampas de captura de NO_x enfrentan menores retos técnicos en motores de gasolina que en los de Diesel, dado que la temperatura de combustión puede ser más fácilmente controlada. Las trampas de captura de NO_x proporcionan eficiencias por encima de 90% en la captura y conversión de NO_x a N₂, pero exigen combustibles virtualmente libres de azufre para un uso eficiente.

Las trampas de captura operan mediante la incorporación de óxidos básicos en el catalizador, los cuales reaccionan con el NO₂ oxidado en presencia de O₂ para formar nitratos. El NO₂ puede ser capturado de esta manera durante condiciones de combustión pobre (exceso de oxígeno). Conforme el medio de captura se acerca a su saturación, o cuando existe aceleración, el motor funcionará con mezclas ricas de combustible, generando CO y gases de HC. Esto provoca la liberación de NO₂ que reacciona oxidando el CO y los HC a CO₂ y H₂O respectivamente, reduciéndose simultáneamente a N₂, del mismo modo que en un TWC.

Las trampas de captura de NO_x son altamente eficientes con combustibles libres de azufre. El azufre reduce su eficiencia y tiempo de vida. El bióxido de azufre compite con los NO_x por superficie de captura en el catalizador. Los sulfatos capturados en el catalizador se adhieren a su superficie con mayor fuerza que los nitratos y el catalizador sólo puede ser regenerado con mezclas ricas en combustibles y altas temperaturas de combustión. La eficiencia original del catalizador podría no recuperarse nunca después del envenenamiento con azufre, especialmente en vehículos muy afinados, de baja emisión, los cuales no pueden alcanzar temperaturas suficientemente elevadas para la desulfuración.

La combustión de una mezcla rica, a alta temperatura, necesaria para purgar el azufre del catalizador, reduce significativamente los beneficios de eficiencia energética de los motores de mezcla pobre. Cuando la eficiencia del catalizador cae del 95% al 90%, las emisiones de NO_x en el escape se duplican y ocurre la desulfuración. Con combustibles virtualmente libres de azufre, las trampas de captura no necesitan regenerarse por más de 5,000 millas. Con 7 ppm de azufre, ocurre una caída de la eficiencia al 90% después de 1,695 millas, requiriéndose la desulfuración. Como se muestra en la figura 2, con combustibles por encima de 40 ppm de azufre la distancia entre eventos de desulfuración cae por un poco más de 100 millas. Esta distancia entre eventos de desulfuración se relaciona directamente con el consumo de combustible.

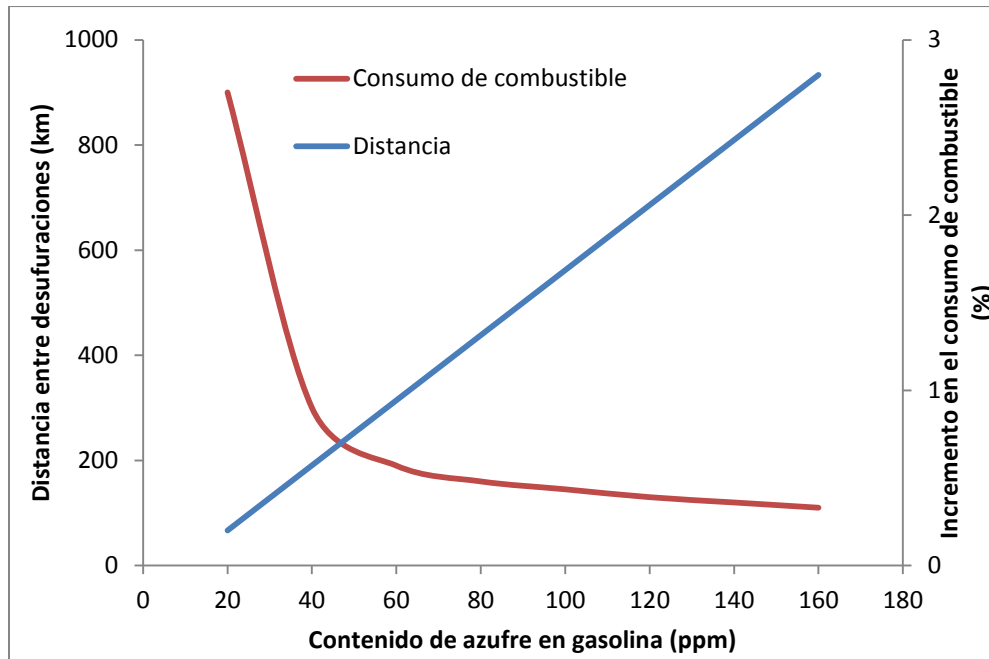


Figura 2. Efectos del contenido de azufre en la distancia entre desulfuraciones y el consumo de combustible

Fuente: Blumberg, Walsh y Pera, *Gasolina y Diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*, 2003.

Los catalizadores de absorción de NO_x requieren para su funcionamiento óptimo del uso de gasolina con un contenido promedio de azufre de 6 ppm.

5.6.2 Vehículos a Diesel

Debido a su eficiencia de combustible y gran poder, los motores Diesel han sido fuertemente favorecidos para aplicaciones de uso pesado. Los motores a Diesel ofrecen algunos beneficios de emisiones sobre los de gasolina. Los motores Diesel convencionales típicamente usan sólo 70% del combustible requerido por un motor de gasolina comparable, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂ por milla. Al igual que los motores de mezcla pobre de gasolina en desarrollo, los motores Diesel proveen un beneficio automático en el control de CO y HC. El Diesel tiene el beneficio adicional de una baja volatilidad, que disminuye las emisiones por evaporación de HC. Las emisiones promedio de CO en vehículos Diesel de uso común son un orden de magnitud menores que las de un vehículo equivalente a gasolina. Las emisiones totales de HC son de casi una tercera parte de los vehículos a gasolina.

La principal preocupación en los motores a Diesel son las emisiones de NO_x y PM. En el pasado, los fabricantes de vehículos a Diesel se apoyaron principalmente en el mejoramiento de los motores Diesel para el cumplimiento de normas de emisión. En consecuencia, queda un limitado potencial para reducciones adicionales de NO_x a través de modificaciones en el motor (tales como la recirculación de los gases de escape y el retraso del tiempo de inyección). Las

emisiones actuales de PM, a pesar de que son drásticamente menores que las de los primeros vehículos a Diesel, continúan siendo de un orden de magnitud superiores que las de los vehículos a gasolina.

En tanto que las regulaciones del pasado se enfocaron primariamente en vehículos de carga ligera, las regulaciones más recientes en los Estados Unidos, Europa y Japón también han especificado los niveles de emisión para vehículos Diesel de uso pesado.

Las normas de emisión también han comenzado a extenderse a otros motores, tales como equipo de construcción y generadores. Históricamente, estos vehículos y maquinarias han enfrentado pocas regulaciones, lo que ha favorecido que consuman los combustibles de Diesel con mayor contenido de azufre.

5.6.2.1 Sin control de emisiones

En los vehículos a Diesel, la reducción del azufre no solamente reduce las emisiones de SO₂, también reduce significativamente las emisiones de partículas. En una corriente de escape rico en oxígeno como la de los vehículos a Diesel, un porcentaje variable del SO₂ formado durante la combustión es oxidado hasta SO₃, el cual se disuelve en el vapor de agua presente hasta formar vapor de ácido sulfúrico (H₂SO₄). El H₂SO₄ es una de las pocas sustancias que es capaz de nucleación homogénea, lo cual parece ser el mecanismo más importante para iniciar la formación de partículas ultrafinas en las corrientes de escape de Diesel, produciendo partículas de nueva formación de aproximadamente 1 nm (Shi y Harrison, consultado en Lead, 2009). A pesar de que las partículas de sulfato sólo constituyen una pequeña fracción del volumen o la masa de partículas, en cambio son una fracción relativamente grande del número total de partículas. Y las nanopartículas de sulfato proveen un área relativamente grande en la cual condensan las especies de HC, dando como resultado un crecimiento del tamaño y la toxicidad de estas partículas (Shi y Harrison, consultado en Lead, 2009).

Aún sin el beneficio de controles adicionales de emisiones, reducir los niveles de azufre en el Diesel reduce tanto las emisiones de PM como los efectos carcinogénicos y tóxicos de las partículas formadas. Adicionalmente, las emisiones de SO₂ pueden dar lugar a la formación de contaminantes secundarios (contaminantes que se forman en el ambiente a partir de otras partículas y gases).

5.6.2.2 Catalizadores de oxidación para vehículos a Diesel

Los catalizadores de oxidación para vehículos a Diesel (Diesel oxidation catalysts, DOC) son la tecnología de postratamiento de control de emisiones más común en los vehículos Diesel actuales. A pesar de no estar tan ampliamente extendidos como los TWC en vehículos a gasolina, los DOC son muy similares a los primeros catalizadores usados para motores de gasolina. Los catalizadores de oxidación trabajan oxidando el CO, los HC y la fracción orgánica soluble de las PM a CO₂ y H₂O en la corriente de escape rica en oxígeno de los motores Diesel.

Cuando el azufre se encuentra presente en el combustible, los DOC también incrementan la tasa de oxidación del SO₂, dando lugar a un aumento drástico en

las emisiones de nanopartículas de sulfatos. De este modo, un DOC, cuando es usado con combustible de alto contenido de azufre, puede incrementar de manera importante las emisiones de las partículas más pequeñas y potencialmente más dañinas. Con combustibles de bajo azufre, en cambio, un DOC puede llevar a una reducción del 15-31% en emisiones de PM.

5.6.2.3 Filtros de partículas de Diesel

Los Filtros de Partículas de Diesel (Diesel Particulate Filters, DPF) han demostrado eficiencias por encima del 95% con combustible UBA. Los filtros de Diesel son capaces de reducir el número total y la masa de emisiones de partículas por debajo de los motores de gasolina, como se muestra en la figura 3 (Ahlvik, 2002).

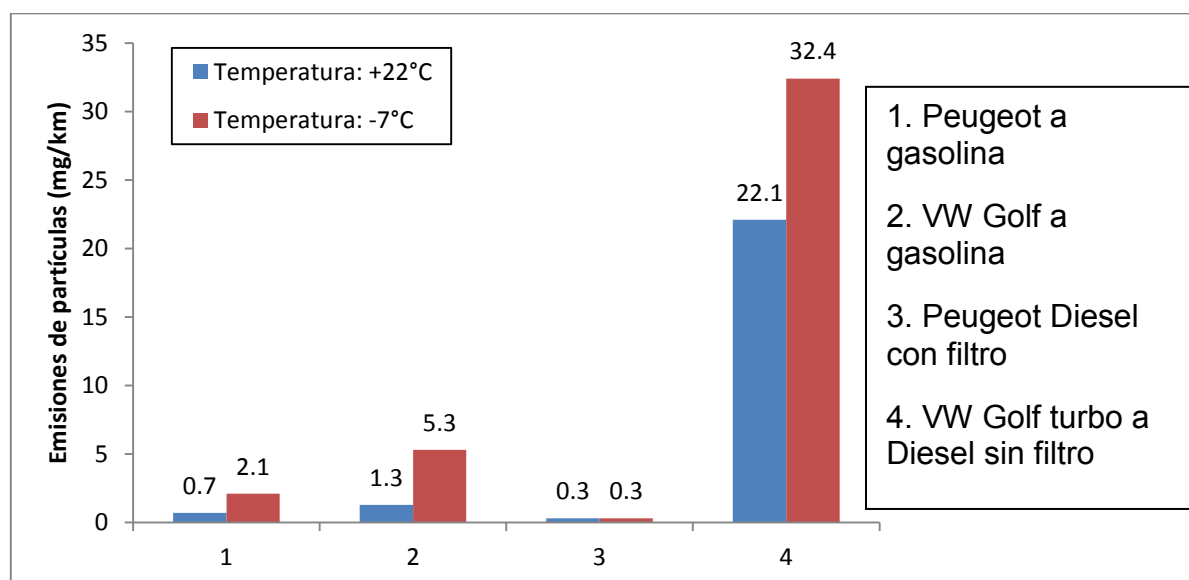


Figura 3. Comparación de emisiones de PM entre vehículos a gasolina y vehículos a Diesel

Fuente: Blumberg, Walsh y Pera, *Gasolina y Diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*, 2003.

Un área importante de la investigación en el desarrollo de estos filtros –el área con mayor impacto por los niveles de azufre en los combustibles- es la regeneración pasiva o limpieza de las partículas colectadas en la superficie del filtro. Los filtros necesitan ser limpiados, sin la intervención humana, antes de alcanzar su capacidad límite para mantener el funcionamiento del vehículo y la eficiencia del combustible y del filtro. El azufre reduce la eficiencia de los DPF y puede dar lugar a la formación de PM de sulfatos.

El filtro de Partículas Diesel de Regeneración Continua (The Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter, CR-DPF) y el Filtro Catalizador de Partículas Diesel (Catalyzed Diesel Particulate Filter –CDPF-) son dos ejemplos de control de PM del 95% con combustible de 3 ppm de azufre. Sin embargo, la

eficiencia cae hasta 0 con combustible de 150 ppm de azufre y las emisiones de PM se duplican a partir de la línea base con combustibles de 350 ppm de azufre. El incremento en la masa de PM proviene principalmente de la unión con agua para formar ácido sulfúrico. Las emisiones de polvo también se incrementan con combustibles de alto azufre, aunque incluso con 350 ppm de azufre los DPF mantienen una eficiencia de alrededor del 50% para las PM que no son sulfatos.

Con el uso de combustibles UBA, los DPF proporcionan un control efectivo para todos los tamaños de partículas, incluyendo las menores, que son las más dañinas para la salud humana. Los vehículos a Diesel con filtros de partículas generan emisiones de PM comparables a las de los vehículos a Gas Natural Comprimido (Compressed Natural Gas, CNG), que son frecuentemente promovidos como la alternativa de baja emisión para los vehículos Diesel.

5.6.2.3 Tecnologías de retrofit

Los vehículos de carga pesada duran mucho tiempo. La vida media esperada de camiones pesados desde los modelos del año 1990 es de 29 años, y la vida media de los autobuses es de 16 años (Davis y Diegel, 2002). Por otra parte, las emisiones tienden a incrementarse con la edad de los vehículos. Esto significa que los beneficios completos de las normas de emisión tardan en notarse varios años. De este modo, son cruciales los programas de reducción de emisiones de vehículos viejos en los esfuerzos de corto plazo para mejorar la calidad del aire.

Las tecnologías de retrofit (retroadaptación) pueden reducir drásticamente las emisiones de los vehículos existentes. Los catalizadores de oxidación y los filtros de partículas para vehículos pesados a Diesel son las tecnologías de retrofit más comunes.

Los catalizadores de oxidación para vehículos Diesel son la opción de retrofit más sencilla, más flexible y menos costosa. Con el uso de combustibles de azufre reducido o bajo azufre, un DOC puede alcanzar de 20 a 50% de reducción de más de 70% de HC tóxicos (Blumberg *et al*, 2003). En tanto que los DOC son menos sensibles al azufre que la tecnología de filtración de partículas, el incremento en los niveles de azufre resulta en una reducción de la eficiencia de conversión del catalizador y puede incrementar la formación de sulfatos, resultando incluso en mayores emisiones de partículas que sin el catalizador.

Los DPF son también una opción efectiva y sencilla de retrofit, pero exigen el uso de combustible de bajo azufre o ultra bajo azufre.

5.7 Calidad internacional de los combustibles fósiles

En los últimos años, Estados Unidos, la Unión Europea, Japón, Australia y otros países industrializados han emprendido acciones para reducir los límites máximos permisibles de emisiones de vehículos a través de la introducción de mejores tecnologías de control, en conjunto con la reducción del contenido de azufre en sus combustibles como se observa en la tabla 8 (los estándares de México no se incluyen en esta tabla; se muestran por separado más adelante). Siguiendo esta misma tendencia, varios países en desarrollo están tomando acciones similares

para reducir el impacto del sector de transporte en la calidad del aire y minimizar barreras no arancelarias al tránsito y comercio internacionales.

Tabla 8. Estándares internacionales del contenido de azufre en gasolinas (promedio/máximo en ppm)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
EUA	120/300	90/300	30/80			
UE		50				10
Japón	50					
Hong Kong	150 (desde 2001)					
Australia		150				
Argentina		600	500		300	50
Brasil	1000					80
Chile	400	100	30			

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

En el 2004, la gasolina estadounidense contenía un promedio de 120 ppm y un máximo de 300 ppm de azufre. Para el 2005 el promedio bajó a 90 ppm y el máximo siguió siendo de 300 ppm; en el 2006 llegó a un promedio de 30 ppm y contenido máximo de 80 ppm de azufre. En Europa el contenido se redujo a 10 ppm a partir de 2009. Asimismo, en otros países actualmente desarrollan estrategias para reducir el contenido de azufre en sus combustibles. Por ejemplo, Tailandia cuenta con combustible con un máximo de 10 ppm de azufre desde el 2010. Vietnam autorizó en el 2010 la reducción del contenido de azufre en Diesel a 50 ppm, lo mismo que China. En Brasil existen planes para reducir el contenido de azufre en Diesel a 50 ppm primero en las ciudades principales, y después en todo el país. Del mismo modo, en muchos otros países ya existen negociaciones para reducir el contenido de azufre en Diesel. Gracias a estas acciones, en un periodo de sólo 5 años (de 2005 a 2010), el Diesel con contenido de azufre de entre 10 y 15 ppm pasó de ser sólo el 15% a nivel global a ser poco más del 70%, como se observa en la figura 4.

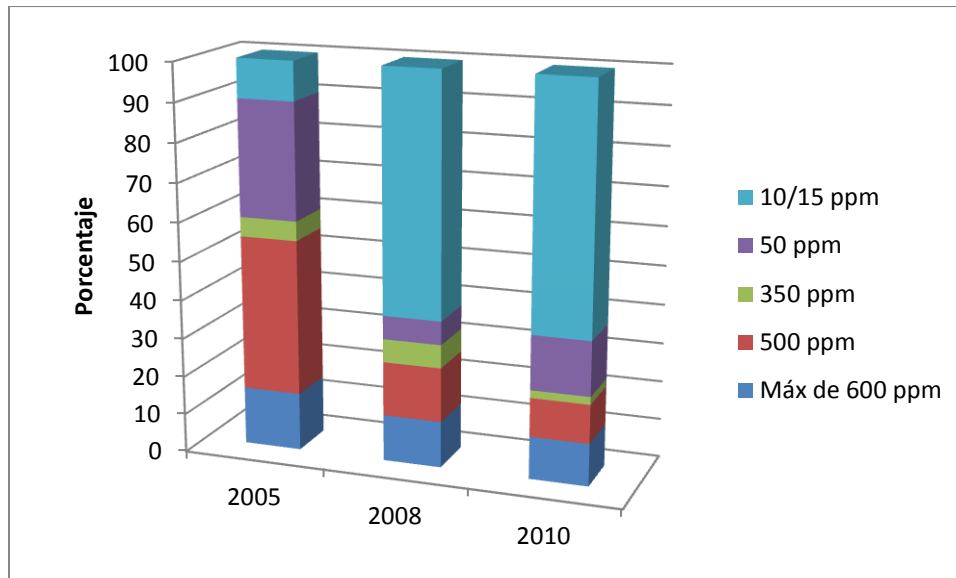


Figura 4. Distribución global del contenido de azufre en Diesel

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

5.8 Consumo de combustibles vehiculares en México, calidad histórica

A principios de los noventa Pemex Refinación elaboraba dos tipos de gasolinas automotores: Nova y Magna Sin. La gasolina Nova contenía plomo y era de bajo octanaje; la gasolina Magna Sin, introducida en 1990 no contenía plomo, y contaba con un octanaje equivalente a la gasolina regular sin plomo del mercado norteamericano. Existían dos tipos de gasolina Magna Sin: normal y oxigenada, esta última destinada a las zonas ambientales críticas, es decir, ZMVM, ZMG y ZMM, debido a que los oxigenantes reducen las emisiones de contaminantes, especialmente el monóxido de carbono.

A partir de la introducción de la gasolina Magna Sin comenzó el retiro paulatino de la gasolina Nova del mercado. De esta manera, las ventas de Nova pasaron del 66 por ciento del total de ventas de gasolinas en 1993 a cero en 1997, como puede verse en la figura 5. Asimismo, a partir de 1993, Pemex Refinación inició la producción y distribución en el mercado de la gasolina Pemex Premium, con un índice de octano de 93, superior al de la gasolina Premium del mercado norteamericano (de 92 octanos).

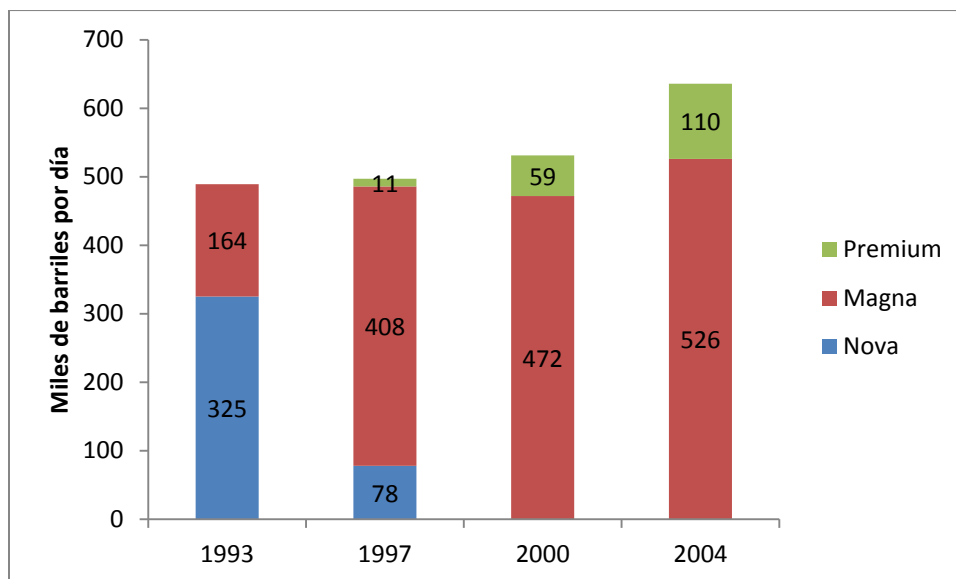


Figura 5. Volumen de venta de gasolinas, 1993-2004

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

Actualmente, Pemex Refinación elabora la gasolina Pemex Magna en dos especificaciones: Pemex Magna Oxigenada y Pemex Magna Convencional; la primera está formulada para las grandes zonas metropolitanas del país (ZMVM, ZMG y ZMM) y la segunda para el resto del país.

En lo que se refiere al Diesel, se efectuaron esfuerzos similares para mejorar su calidad. En la década de los noventa existían dos tipos: el Diesel desulfurado- con 1000 ppm de azufre- y Pemex Diesel con 500 ppm. En 1994 comenzó el retiro paulatino del primero de ellos, mediante el incremento en el volumen de producción de Pemex Diesel (figura 6). Actualmente, el mercado nacional cuenta con dos calidades de este último: uno para el consumo en ZMVM, ZMG y ZMM, con un contenido de 300 ppm de azufre, y otro para el resto del país, con 500 ppm de azufre. Adicionalmente, en 2004 Pemex Refinación inició la producción de Pemex Diesel de 50 ppm de azufre, para unidades de transporte público de la ciudad de México.

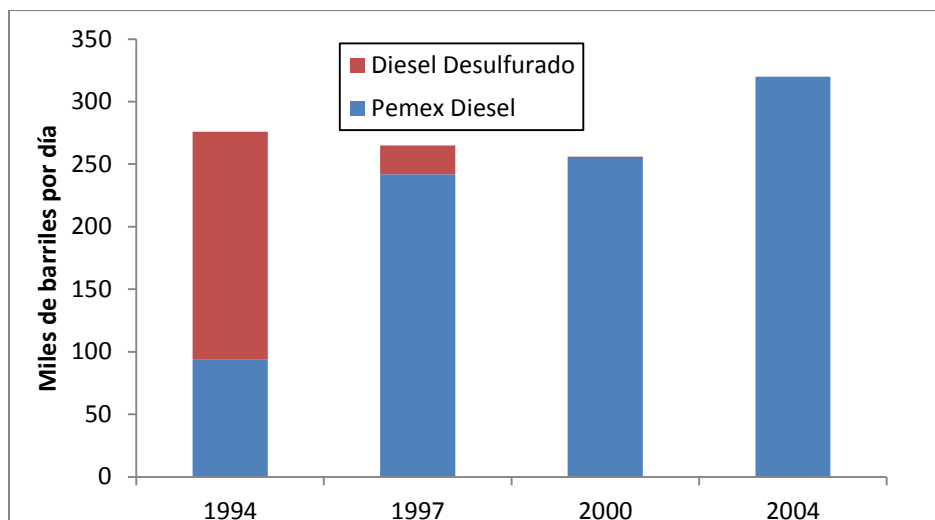


Figura 6. Volumen de ventas de Diesel, 1993-2004

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

A partir del petróleo crudo, enviado a las refinerías desde Nuevo Teapa, Veracruz, por medio de la red de oleoductos y por buques tanque, se obtienen combustibles (entre ellos Diesel y gasolinas) y otros derivados del petróleo para la petroquímica básica en las seis refinerías de Pemex Refinación. Estos productos son distribuidos mediante la infraestructura de poliductos hacia las terminales de almacenamiento y distribución, en donde se programan los volúmenes a transportar mediante la flota marítima y terrestre, de acuerdo con la demanda de la zona de influencia.

Las proyecciones para 2025 indican que el consumo mundial de energía crecerá a una tasa de 1.9% anual, siendo el petróleo la fuente principal de energía primaria en las próximas dos décadas. También se espera que el consumo de gasolinas aumentará un 3% en promedio anual, y que el consumo de Diesel aumentará en un 2.9% (SEMARNAT, INE, SENER, 2006)

5.9 Contenido de azufre en gasolinas en México

Las refinerías de México están construidas para procesar tres variedades de petróleo crudo con diferentes cantidades de azufre como son: crudo Maya (3.3% en peso de azufre), crudo Istmo (1.3% en peso de azufre) y crudo Olmeca (0.8% en peso de azufre).

En cuanto a gravedad API, el crudo procesado en el SNR se divide en cuatro tipos:

- Crudo pesado. Gravedad API igual o inferior a 27°.
- Crudo ligero. Gravedad API entre 27° y 38°.
- Crudo superligero. Gravedad API superior a 38°.
- Crudo reconstituido. Es el crudo al cual se le han extraído naftas y otros hidrocarburos ligeros para la producción de aromáticos.

En la tabla 9 se muestra el total y el tipo de crudo que maneja cada una de las refinerías del SNR.

Tabla 9. Tipo de crudo procesado en cada refinería en el año 2008

Refinería	Crudo pesado (Mbd)	Crudo ligero (Mbd)	Crudo ultraligero (Mbd)	Crudo reconstituido (Mbd)	Total
Cadereyta	115	94	0	0	209
Madero	120	32	0	0	152
Minatitlán	54	108	0	0	162
Salamanca	52	125	15	1	193
Salina Cruz	86	142	0	51	279
Tula	76	191	0	0	267
Total	503	692	15	52	1262

Fuente: Alcántar González Fabiola Selene y Cruz Gómez M. Javier, *Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SO_x y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación, 2009*

Se puede apreciar que las refinerías de Cadereyta y Madero ocupan de 55 a 79% de crudo pesado y de 21 a 45% de crudo ligero; mientras Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula ocupan de 51 a 72% de crudo ligero y de 28 a 33% de crudo pesado. Por otra parte, solamente Salamanca y Salina Cruz trabajan con el 1 al 8% de crudo reconstituido, y Salamanca es la única que procesó crudo ultraligero (8%).

Alcántar González y Cruz Gómez realizaron un balance de materia de azufre en cada una de las refinerías de México para conocer la distribución de azufre. Los resultados globales que obtuvieron para la entrada de azufre al SNR durante el año 2008 se muestran en la figura 7.

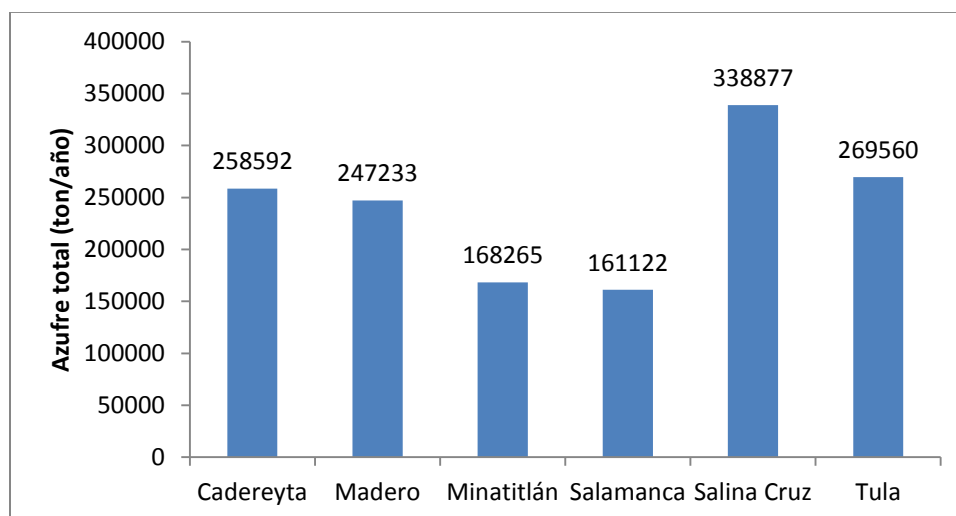


Figura 7. Azufre total en el crudo y otros insumos que se procesan en el SNR

Fuente: Alcántar González Fabiola Selene y Cruz Gómez M. Javier, *Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SO_x y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación, 2009*

En la tabla 10 se muestra la cantidad de productos petrolíferos elaborados por el SNR de 2007 a 2009, así como la cantidad de azufre contenida en dichos productos en el año 2008.

Tabla 10. Elaboración y contenidos de azufre en productos petrolíferos del SNR

Refinería	Elaboración de petrolíferos (MBIs)			Azufre en productos en el año 2008 (ton/día)
	2007	2008	2009	
Cadereyta	218.5	220.1	224.5	325.3
Madero	160.6	163.4	160.7	362.6
Minatitlán	173.8	171.7	179.7	399.6
Salamanca	183.8	193.1	189.1	350.7
Salina Cruz	284.0	290.0	289.6	756.7
Tula	291.8	268.6	299.2	521.6
Total	1312.4	1306.9	1342.7	2716.5

Fuente: Alcántar González Fabiola Selene y Cruz Gómez M. Javier, *Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SO_x y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación, 2009*

En la figura 8 se muestra la cantidad de azufre contenida en los productos de cada una de las refinerías.

En México, el 15 de abril de 2004, Pemex introdujo al mercado mexicano la gasolina Pemex Premium con un contenido de azufre de 250 ppm promedio/ 300 ppm máximo en las zonas metropolitanas del país, de 92 octanos, la cual reduciría en un 40% las emisiones de contaminantes a la atmósfera y mejoraría el rendimiento de los automotores. Por otra parte, el 11 de enero de 2006 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, “Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental”, cuyo objetivo fue reducir el contenido de azufre de los combustibles. La principal preocupación en los motores a Diesel son las emisiones de NO_x y PM.

De acuerdo a esta norma, el contenido de azufre de la gasolina Pemex Premium se redujo de 250 ppm promedio/300 ppm máximo a 30 ppm promedio/ 80 ppm máximo a partir de octubre de 2006. Mientras que para la gasolina Pemex Magna se redujo de 300 ppm promedio/500 ppm máxima a Pemex Magna Oxigenada con 30 ppm promedio/80 ppm máximo a partir de octubre de 2006 en las zonas metropolitanas, como son la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Guadalajara (ZMG) y Monterrey (ZMM); mientras que para el resto del país se obtendría a partir de enero de 2009 la gasolina Pemex magna de 30 ppm promedio/ 80 ppm máximo.

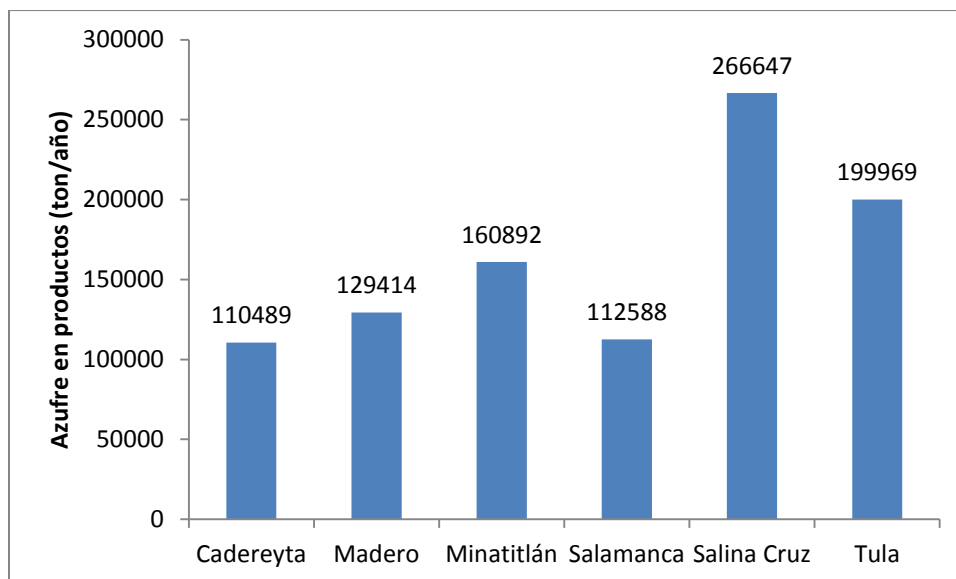


Figura 8. Azufre contenido en los productos elaborados por Pemex Refinación.

Fuente: Alcántar González Fabiola Selene y Cruz Gómez M. Javier, *Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SO_x y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación, 2009*

En el Diesel se redujo el contenido de 500 ppm máximo a Diesel UBA con 15 ppm a partir de enero de 2007 en la Zona Fronteriza Norte (Cd. Obregón, Ensenada, Hermosillo, Magdalena, Mexicali, Nogales, Rosarito y Ciudad Madero). Para la ZMVM, ZMG y ZMM se realizó la reducción de azufre a 15 ppm en el Diesel a partir de enero de 2009, y a partir de septiembre de 2009 en el resto del país.

Fue a partir de enero de 2009 cuando se inició la producción de gasolina Pemex Magna UBA y Pemex Diesel UBA en las refinerías de Cadereyta, Salamanca y Tula, siendo la producción total de gasolinas UBA de 82 Mbd de los cuales la refinería de Cadereyta produjo 15 Mbd, Salamanca 19 y Tula 48. Mientras que la producción de Diesel UBA fue de un total de 45 Mbd, de los cuales Cadereyta procesó 28, Salamanca 9 y Tula 7. Aunque cabe destacar que la producción de Pemex Magna UBA sólo representó el 18% del total de gasolinas y el Diesel UBA representó el 13% del total de Diesel. En el caso del Diesel UBA, de acuerdo a la NOM-086 se empezaría a distribuir en enero de 2009 en las zonas metropolitanas; sin embargo, fue en agosto cuando se empezó la distribución de Diesel UBA en la ZMM, en julio de 2009 en la ZMG y en diciembre de 2009 en la ZMVM.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Premium	500 Máx.									
		250 Prom./300 Máx. Prom. 2004=208								
							30 Prom./80 Máx.			
Magna ZM	500 Máx. (Prom. 2004=421)									
							30 Prom./80 Máx.			
Magna RP	1000 Máx. (Prom. 2004=737)									
							30 Prom./80 Máx.			
Diesel ZM	500 Máx.									
			300 Máx.							
							15 Máx.			
Diesel ZF						15 Máx.				
Diesel RP	500 Máx. (Prom. 2004=420)									
							15 Máx.			

Figura 9. Calendario de introducción de combustibles vehiculares con bajo contenido de azufre

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles.*

Para que Pemex Refinación cumpliera con la NOM-086, se consideró el proyecto de Calidad de Combustibles. El alcance de este proyecto considera para gasolinas el desarrollo de ingeniería, la procura, construcción, pruebas y puesta en marcha de plantas desulfuradoras de gasolina catalíticas, unidades regeneradoras y de amina, purificadoras de hidrógeno, sistemas complementarios y servicios auxiliares. El proyecto se dividió en tres paquetes de obra. El primero considera a las refinerías de Tula y Salamanca, el segundo a Madero y Cadereyta, y el tercero a Minatitlán y Salina Cruz. En 2009 concluyó la ingeniería básica y conceptual de Cadereyta, mientras que en las otras refinerías estaba en ejecución el licenciamiento de tecnologías.

Las tres principales vertientes de este proyecto están integradas por gasolina, Diesel y servicios auxiliares. Para la fase gasolinas se consideró originalmente la construcción de 11 plantas de postratamiento y como servicios auxiliares la construcción de siete plantas secundarias asociadas al proyecto, entre las que se contemplaron 4 plantas de hidrogenación, 3 plantas de azufre, así como plantas para la generación de energía. Sin embargo, en agosto de 2008, la Comisión Intersecretarial de Gasto Financiero (CIGF) autorizó que se modificara el monto y el alcance del proyecto, en el cual se redujo a ocho el número de plantas nuevas, con ajustes menores en plantas complementarias.

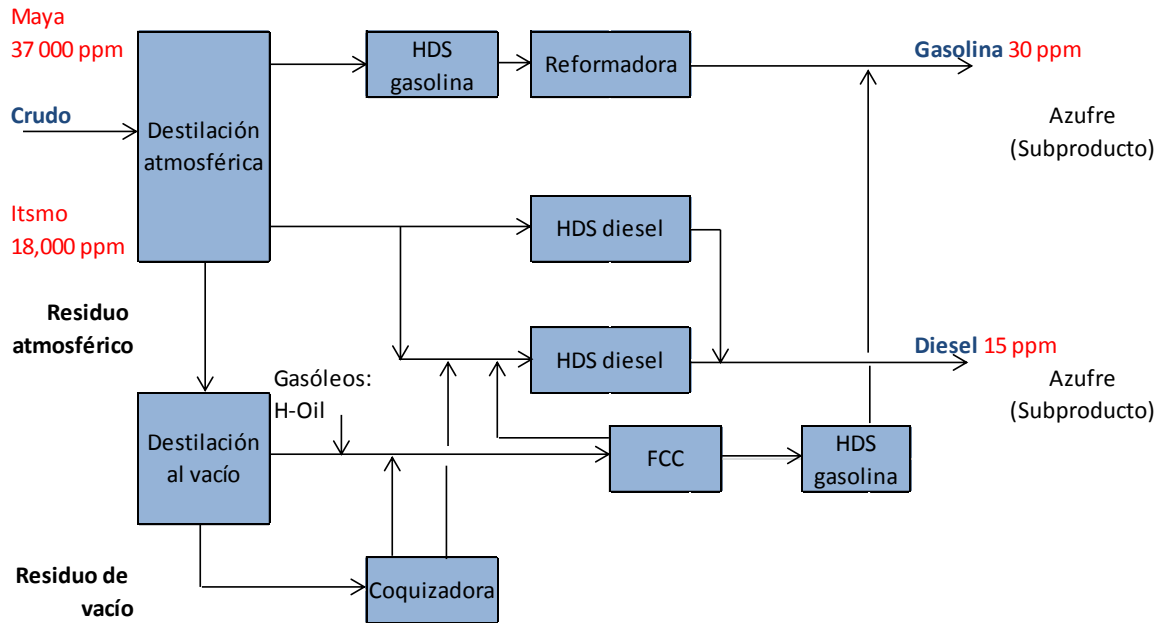


Figura 10. Diagrama de flujo simplificado para la producción de gasolina y Diesel de bajo contenido de azufre

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

En la tabla 11 se muestran los proyectos que se tienen en el Sistema Nacional de Refinerías (SNR) para obtener Diesel UBA.

Tabla 11. Proyectos en el SNR para la obtención de Diesel UBA

Refinería	Modernización de plantas de destilados intermedios	Construcción de hidrosulfuradoras de Diesel
Cadereyta	3	1
Madero	2	1
Minatitlán	1	2
Salamanca	3	
Salina Cruz	4	
Tula	5	

Fuente: Alcántar González Fabiola Selene y Cruz Gómez M. Javier, *Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SO_x y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación*, 2009

En la producción de gasolina, la nafta catalítica contribuye con entre el 30 y el 40% del total de volumen, y del 80 a 90% del total de azufre. El resto lo conforman productos de bajo azufre como el alquilado, isómeros, reformado y oxigenados, entre otros.

Por lo anterior, la estrategia para la remoción de azufre gira alrededor del tratamiento de corrientes involucradas en la unidad de desintegración catalítica (FCC), y se propone el post-tratado, que implica la remoción del azufre contenido en la nafta catalítica mediante las plantas denominadas “hidrotratamiento de naftas”, como se muestra en la figura 11.



Figura 11. Esquema para la producción de gasolina de 30 ppm de azufre

Fuente: SEMARNAT, INE Y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles*.

Este tipo de tecnología implica el tratamiento con hidrógeno de la nafta catalítica. Sin embargo, se tiene una ligera pérdida de rendimiento y una disminución en el octano en la corriente. Este proceso conlleva costo por inversión y por incremento en el consumo de servicios auxiliares.

La producción de gasolinas UBA en el SNR se obtuvo al instalar plantas hidrodesulfuradoras de gasolina catalítica, empleando la ingeniería desarrollada por el licenciador Catalytic Distillation Technologies (CDTECH).

En febrero de 2014, el Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos aprobó el Proyecto de Calidad de Combustibles Limpios fase Diesel para las refinerías de Madero, Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula. Esta fase del proyecto contará con una inversión total de más de 3 mil 400 millones de dólares.

El objetivo de este proyecto es producir Diesel UBA en las citadas cinco refinerías. Se tiene estimado que el proyecto se desarrollará en un plazo total de 45 meses.

Un estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Ecología (INE) y Pemex Refinación, considera que si bien dicho proyecto no implica un beneficio económico directo

para Pemex, sí se obtienen a nivel nación beneficios en la salud pública y en la calidad del aire. En términos de salud pública, la introducción de combustibles de bajo contenido de azufre significaría, para el periodo 2006-2039, que se evitarán 166,000 casos de bronquitis crónica, 78,371,000 de días perdidos de trabajo y de actividad restringida, representando un beneficio monetario presente de 11.4 miles de millones de dólares norteamericanos (SEMARNAT, INE, SENER, 2006). A diferencia del presente trabajo, el estudio referido no considera la reducción en casos de mortalidad.

En el caso de Estados Unidos, la Agencia de Protección al Ambiente determinó que los beneficios en la salud humana y en el ambiente por la reducción de azufre eran 10 veces mayores que los costos, con beneficios netos de \$86 mil millones de dólares (EPA 1999 y 2000). En Europa, los combustibles de ultra bajo azufre fueron considerados por sí solos, sin el beneficio adicional de normas de emisiones más estrictas. Ahí, el incremento en el rendimiento energético fue el principal beneficio, siendo éste de 2 mil millones de dólares. Además, el potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es un beneficio sustancial de los combustibles de bajo azufre (Blumberg *et al.* 2003)

5.10 Efectos de los contaminantes sobre el organismo

5.10.1 Efectos crónicos, agudos y subagudos

- **Agudos:** se observan inmediatamente o en un tiempo corto de la exposición.
- **Crónicos:** continuamente, por largo tiempo (mayor que 3 meses). Pueden presentarse, por ejemplo, si el compuesto en cuestión entra al organismo más rápido de lo que se desecha y resulta en una acumulación del compuesto en el cuerpo que eventualmente producirá el efecto. Los tumores cancerígenos son ejemplo de este tipo de efectos.
- **Subagudos:** entre 1 y 3 meses.

5.10.2 Efectos reversibles e irreversibles

- **Reversibles:** desaparecen si se para la exposición. Ejemplo: mareo provocado por inhalación de vapores de hexano.
- **Irreversibles:** no desaparecen. Ejemplo: efectos cancerogénicos.

Una misma sustancia química puede provocar efectos irreversibles y reversibles, dependiendo de la concentración y del tiempo de exposición.

5.10.3 Efectos locales, sistémicos y órgano blanco

- **Locales:** se observan en la parte del cuerpo que entra en contacto directamente a la sustancia química.
- **Sistémicos:** requieren que el agente químico se asimile y se distribuya, alcanzando eventualmente al órgano blanco. Éste se puede afectar debido

a varias razones, ya sea porque recibe al agente químico en mayor cantidad o porque lo convierte más eficientemente en su forma final tóxica.

La afectación a un órgano puede dañar a otros órganos por un mecanismo secundario. El sistema nervioso central es el sistema más afectado comúnmente, seguido del sistema circulatorio. Los órganos blanco más frecuentes son el hígado, los riñones, los pulmones y la piel.

5.11 Evaluación de beneficios

La parte del beneficio de la herramienta de cálculo está todavía en desarrollo por el SEI y actualmente sólo es capaz de evaluar los impactos sobre la salud humana a la exposición a partículas (PM). Los coeficientes necesarios para evaluar los impactos del ozono (O₃) sobre la salud, los cultivos y en el forzamiento radiactivo, se encuentran en etapa de desarrollo por el SEI. Así, en esta etapa la herramienta de cálculo sólo puede considerarse como un prototipo que aún no se ha terminado, depurado y revisado por expertos para verificar su validez. Sin embargo, actualmente es capaz de modelar beneficios para la salud (debidos a la reducción de la exposición a PM) que resultarían de límites máximos de contenido de azufre más estrictos sobre gasolinas y Diesel.

Una herramienta de Cálculo de Beneficios, basada en una hoja Excel, está siendo utilizada para esta evaluación. Esto incluye hojas de cálculo con los datos globales estándar de emisiones del año base 2005 y las estimaciones para 2030, según dos escenarios: El *Escenario de Referencia* (es decir, “tendencial”, sin la mitigación adicional más allá de la que ya se ha planeado y suponiendo la demanda de combustible en función de las previsiones de la Agencia Internacional de Energía [AIE]); y el escenario resultante al implementar cada uno de los casos de estudio. El conjunto de emisiones por defecto, como el que se usa en el Informe de Evaluación de PNUMA y la OMM [UNEP-WMO, 2011], son derivadas de IIASSA/GAINS y luego se distribuyen en una malla y los faltantes se obtienen del Centro Común de Investigación (CCI) en Ispra (Varese), Italia.

Otras hojas de cálculo contienen coeficientes globales, una malla con coeficientes de ponderación para PM_{2.5} y O₃ que al multiplicarse por las emisiones por defecto (de la malla), dan la concentración de PM_{2.5} y O₃, con esto se obtienen las concentraciones en el país.

El impacto a la salud humana debido a los cambios en las emisiones se estima de factores concentración-respuesta de PM/O₃ y el riesgo relativo para enfermedades cardiopulmonares (suma de afecciones cardiovasculares y respiratorias), cáncer de pulmón, y enfermedades respiratorias (para impacto de O₃ solamente):

$$\Delta Mort = y_0 * Pop * (1 - e^{-\beta(\ln)\Delta X})$$

Donde:

Δ Mort es el cambio de mortalidad debido a un cambio en concentración de $PM_{2.5}$ (u ozono).

y_0 es la tasa de mortalidad promedio base del país (por defecto de Carga Global de Enfermedad).

ΔX es el cambio en el promedio ponderado de población cambio de país en concentración (Modelo de GEOS-Chema Asistente).

β es el factor de concentración-respuesta= en $(RR)/\Delta X$

RR es el riesgo relativo

Cardiopulmonar RR 1.09 per $10 \mu g/m^3$ 1999-2000

Cáncer de pulmón RR 1.14 per $10 \mu g/m^3$ 1999-2000

Enfermedades respiratorias RR para la mortalidad a largo plazo del ozono
1.04

Usando la información y las ecuaciones anteriores, la herramienta de cálculo estima el número de muertes prematuras (carga) en el país debido a la exposición de $PM_{2.5}$ y O_3 resultantes de las emisiones mundiales. Los datos de emisiones no predeterminados para México, generados por el módulo LEAP, se utilizaron como entrada y se presentan en la tabla 12. La calculadora así puede habilitar escenarios de emisiones a comparar y determinar los beneficios para la salud (como las muertes prematuras que se evitan) que se acumularían de implementar medidas de control, como en este caso lo sería la reducción de contenido de azufre en combustibles.

El proceso de sondeo de expertos sólo proporcionó cálculos generales de la relación causa-efecto, y debido a que se requiere que se usen estimaciones de causa-efecto específicos se utilizó el cálculo específico realizado por Pope *et al.* (2002). Esta última estimación se escaló a una tasa de 1.8 de las estimaciones de dosis-efecto generales dadas por el sondeo de expertos de la EPA de E.U.

La tabla 12 presenta los datos de población, tasa de enfermedad, riesgo relativo y concentración-respuesta de factores utilizados en la evaluación de beneficio. Los datos predeterminados fueron proporcionados por la herramienta de cálculo excepto población y demografía. Se utilizaron los mismos para el 2012 y 2030.

Tabla 12. Base de datos para la evaluación de beneficios

	Año histórico	Año histórico	Año de proyección	Referencia
	2005	2012	2030	
Población total	107,151,011	114,289,406	131,478,659	CONAPO
Proporción de población de más de 30 años	0.4850	0.4850	0.5300	CONAPO
Tasa de enfermedad cardiopulmonar para pob. de más de 30 años (proporción por año)	0.00550	0.00550	0.00550	
RR-Enfermedad cardiopulmonar (per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.09	1.09	1.09	ACS [Pope et al., 2002]
Cardiopulmonar β ($\beta=\ln(\text{RR}/10)*1.8$)	0.0155	0.0155	0.0155	
Tasa de cáncer de pulmón para pob. de más de 30 (proporción al año)	0.000347	0.000347	0.000347	
RR- Cáncer de pulmón (por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.14	1.14	1.14	ACS [Pope et al., 2002]
Cáncer de pulmón β ($\beta=\ln(\text{RR}/10)*1.8$)	0.0236	0.0236	0.0236	
Tasa de enfermedad respiratoria para pob. de más de 30 (proporción al año)	0.00162	0.00162	0.00162	
RR- Enfermedad respiratoria (por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.04	1.04	1.04	Jerret et al., 2009
Enfermedad respiratoria β ($\beta=\ln(\text{RR})/10$)	0.0039	0.0039	0.0039	

En un estudio realizado como parte del Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta (SNAP, por sus siglas en inglés, Supporting National Planning) en México se calcularon los beneficios por muertes evitadas debido a la implementación de dos escenarios de mitigación para el año 2030. Los beneficios totales calculados fueron de alrededor de 5,400 muertes prematuras evitadas por el escenario 1 y 5,980 muertes evitadas por escenario 2. Dentro de éste último escenario, 2,032 de las muertes son evitadas por medidas de control en el sector transporte.

La herramienta de análisis de beneficio es útil para una estimación aproximada; sin embargo, para una estimación más detallada una regionalización de modelos globales puede usarse para identificar la mejor exposición de la población.

6. Resultados

En la tabla 13 se muestran las cantidades totales de productos petrolíferos consumidos en el año 2012 en México. Se obtuvieron los datos de consumo en Petajoules (PJ) y el poder calorífico neto de cada producto en el Balance Nacional de Energía 2012 (SENER, 2013). El consumo se convirtió a unidades de volumen, a excepción del consumo de combustóleo, cuyo poder calorífico se expresa en unidades de masa.

Tabla 13. Consumo de productos petrolíferos en el año 2012.

Combustible	Consumo en PJ	Poder calorífico neto (MJ/bl)	Barriles (bl)	m ³
Gas licuado	432.73	4,175	103,647,904	16,480,017
Queroseno (Turbosina)	121.54	5,543	21,926,754	3,486,354
Diesel	540.43	5,650	95,651,881	15,208,649
Diesel UBA	287.82	5,650	50,941,040	8,099,625
Magna	1,170.92	5,122	228,606,654	36,348,458
Magna UBA	209.61	5,122	40,924,144	6,506,939
Premium	136.20	5,122	26,591,810	4,228,098
Combustóleo	496.19	6,324	78,461,417	12,475,365
Coque	138.41	31,758*		

*En MJ/t

El consumo de Diesel y gasolinas viene sin desglosarse en el Balance Nacional de Energía. Para obtener las cantidades de cada tipo de Diesel y gasolina consumido se multiplicó la cantidad total de combustible por el porcentaje producido de cada clase (tabla 14).

Tabla 14. Porcentajes de producción de Diesel y gasolinas.

Diesel (Total: 3010 tanques)			Gasolina (Total: 2750 tanques)		
	Tanques	Porcentaje		Tanques	Porcentaje
Diesel	1964	65.25	Magna	2123	77.20
Diesel UBA	1046	34.75	Magna UBA	380	13.82
			Premium	247	8.98

A fin de calcular el consumo total de cada combustible en kilogramos, y la masa de azufre emitida a la atmósfera por cada uno de ellos se obtuvieron los promedios ponderados de peso específico y contenido de azufre para los productos de Pemex Refinación durante el año 2012 (tablas 15 y 16). Los datos

del coque no se incluyen porque no se encuentran dentro de la información disponible, sin embargo, el peso específico no es necesario para este producto porque es posible calcular la masa consumida haciendo uso sólo de los Petajoules consumidos y de su poder calorífico.

Tabla 15. Promedios ponderados de peso específico en el año 2012, por refinería.

Combustible	Cadereyta	Madero	Minatitlán	Salamanca	Salina Cruz	Tula
Gas licuado	0.5197	0.5138	N/P	0.5535	N/P	N/P
Turbosina	0.7916	0.7939	0.7805	0.7907	0.7912	0.7941
Diesel	0.8276	0.8304	0.8154	0.8304	0.8214	0.8325
Diesel UBA	0.8273	0.8221	0.8224	0.8314	N/P	0.8392
Magna	0.7301	0.7390	0.7469	0.7426	0.7365	0.7399
Magna UBA	0.7201	N/P	N/P	0.7479	N/P	N/P
Premium	0.7241	0.7035	0.6988	0.7481	0.7229	0.7426
Combustóleo	0.9949	1.0065	1.0151	0.9977	1.0095	0.9961

N/P: No producción.

Tabla 16. Promedios ponderados de contenido de azufre

Combustible	Unidad	Cadereyta	Madero	Minatitlán	Salamanca	Salina Cruz	Tula
Gas licuado	ppm	17	2	N/P	12	N/P	N/P
Turbosina	ppm	8	267	348	2205	4	116
Diesel	ppm	454	341	335	360	476	474
Diesel UBA	ppm	9	5	5	7	N/P	10
Magna	ppm	811	683	837	740	778	591
Magna UBA	ppm	41	N/P	N/P	45	N/P	N/P
Premium	ppm	25	40	12	26	29	22
Combustóleo	%peso	4	5	4	4	4	4

N/P: No producción.

Para calcular el promedio ponderado del peso específico en una refinería en particular se obtienen los productos del peso específico promedio de cada mes multiplicado por la cantidad de tanques obtenidos durante el mismo, se suman los productos y el resultado se divide entre el total de tanques producidos durante el año. Para calcular el promedio ponderado del contenido de azufre se sigue el mismo procedimiento.

Una vez obtenido el promedio ponderado de peso específico y contenido de azufre para cada producto y refinería, como puede verse en las tablas 15 y 16, se calculó el promedio ponderado anual de cada producto. Para ello, se multiplicaron los promedios ponderados de cada refinería por los tanques que ésta produjo y el resultado se dividió entre el total de tanques producidos durante el año 2012 por el SNR. Los tanques producidos en cada refinería se especifican en la tabla 17, y los

promedios ponderados de contenido de azufre de cada producto se encuentran en la tabla 18.

Tabla 17. Tanques producidos en el SNR durante el año 2012

Combustible	Cadereyta	Madero	Minatitlán	Salamanca	Salina Cruz	Tula	Total
Gas licuado	91	8	N/P	116	N/P	N/P	215
Turbosina	66	163	59	122	144	337	891
Diesel	395	362	135	381	387	304	1964
Diesel UBA	181	314	331	121	N/P	99	1046
Magna	369	285	275	394	439	361	2123
Magna UBA	153	N/P	N/P	227	N/P	N/P	380
Premium	17	11	27	77	76	39	247
Combustóleo	57	88	241	376	211	530	1503
Total	1329	1231	1068	1814	1257	1670	8369

Tabla 18. Promedios ponderados totales de peso específico y contenido de azufre

Combustible	Peso específico	Azufre promedio (ppm)	Azufre máximo (ppm)
Gas licuado	0.5377	14	140
Turbosina	0.7920	419	3000
Diesel	0.8273	414	500
Diesel UBA	0.8258	6	15
Magna	0.7388	740	1000
Magna UBA	0.7367	43	30 prom. m/ (80)
Premium	0.7304	25	30 prom. m/ (80)
Combustóleo	1.0020	4*	4*

*Porcentaje en peso

Teniendo ya el peso específico ponderado para cada producto durante el año 2012, se calculó el consumo de cada combustible en kilogramos. Se puede observar en la tabla 19 y en la figura 12 que el combustible con más kilogramos consumidos durante el 2012 es la gasolina Magna, con el 32.55%, seguido por el Diesel, con el 15.25%, y por el Combustóleo, con 15.15%.

Tabla 19. Consumo de productos petrolíferos en kilogramos durante el año 2012 y sus porcentajes de consumo.

Combustible	m ³	Peso específico	Gg consumidos	% Consumo
Gas licuado	16,480,017	0.5377	8,861	10.74
Queroseno (Turbosina)	3,486,354	0.7920	2,761	3.35
Diesel	15,208,649	0.8273	12,583	15.25
Diesel UBA	8,099,625	0.8258	6,688	8.11
Magna	36,348,458	0.7388	26,853	32.55
Magna UBA	6,506,939	0.7367	4,794	5.81
Premium	4,228,098	0.7304	3,088	3.74
Combustóleo	12,475,365	1.0020	12,500	15.15
Coque	-	-	4,358	5.28
Total			82,487	100.00

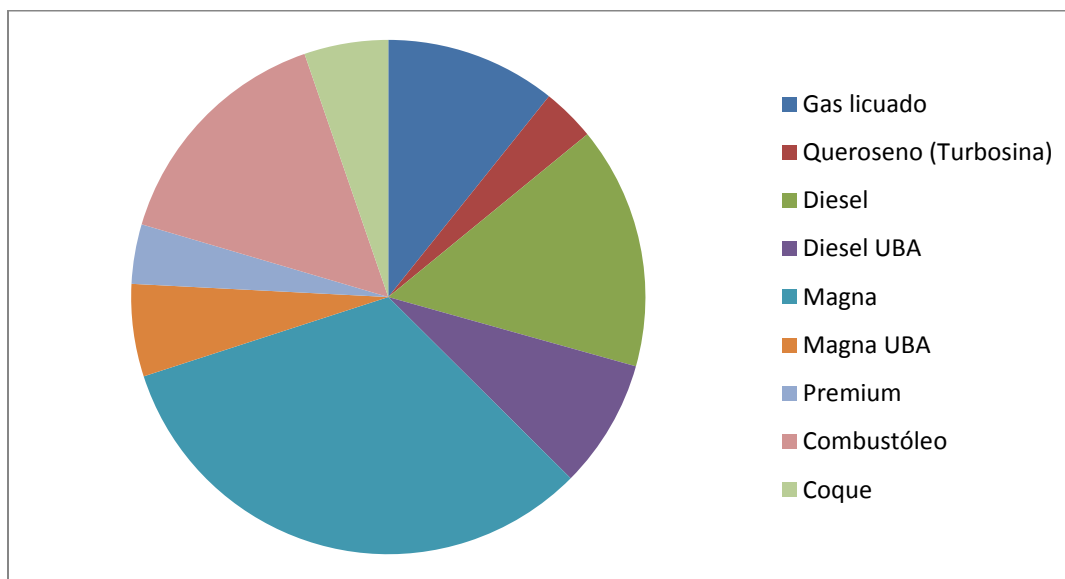


Figura 12. Porcentajes de consumo de petrolíferos durante el año 2012.

Se calculó la cantidad de azufre que hubiera sido emitido a la atmósfera en forma de SO₂ durante el año 2012 si el contenido de dicho elemento en los productos petrolíferos fuera igual a su límite máximo permitido, considerando que el total de azufre contenido en los combustibles se convierte en SO₂ durante la combustión, y que todo el azufre que se encuentra en los combustibles se emite a la atmósfera. Los resultados se encuentran en la tabla 20, y los porcentajes de emisión por producto para este caso pueden observarse en la figura 13.

Tabla 20. Emisión en el año 2012 considerando el límite máximo de contenido de azufre.

Combustible	Gg	Máximo en contenido de azufre	Unidades	Azufre máx. emitido a la atmósfera (Mg)	% Emisión
Gas licuado	8,861	140	mg S/kg	1,241	0.16
Queroseno (Turbosina)	2,761	3000	mg S/kg	8,284	1.09
Diesel	12,583	500	mg S/kg	6,291	0.83
Diesel UBA	6,688	15	mg S/kg	100	0.01
Magna	26,853	1000	mg S/kg	26,853	3.53
Magna UBA	4,794	30	mg S/kg	143	0.02
Premium	3,088	30	mg S/kg	93	0.01
Combustóleo	12,500	4	% peso	500,008	65.71
Coque	4,358	5	% peso	217,914	28.64
	82,487		Total	760,928	100.00
			SO₂ (Mg)	1,521,855	

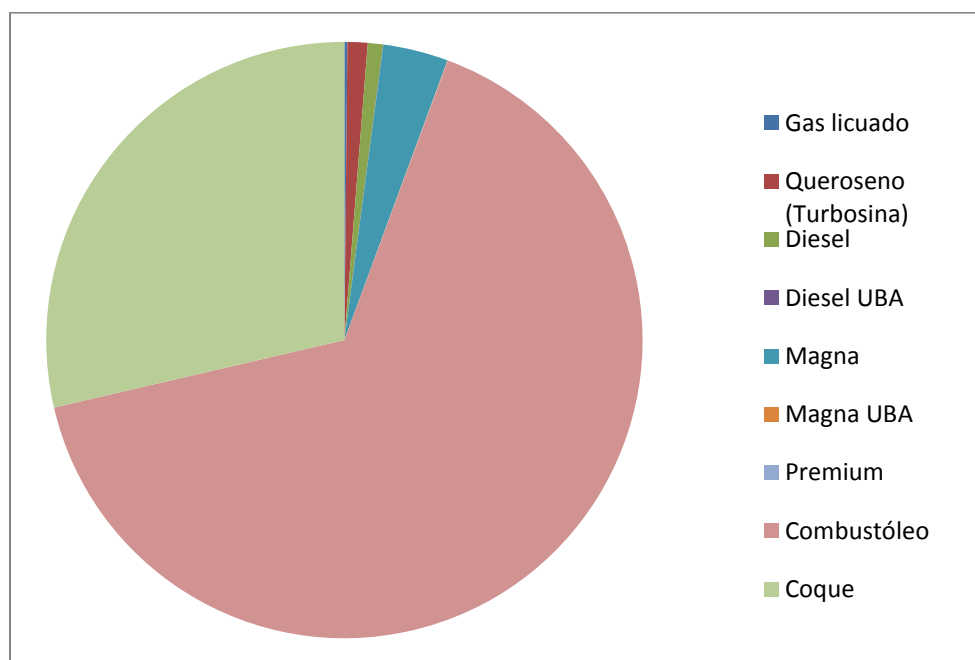


Figura 13. Contribuciones porcentuales de emisión durante el año 2012 considerando el límite máximo de contenido de azufre.

Se calculó también la emisión de azufre durante el año 2012 haciendo uso del promedio ponderado de contenido de azufre en cada producto. Estos resultados se apegan más a las emisiones reales (tabla 21). Los porcentajes de emisión por producto para este caso pueden observarse en la figura 14.

Tabla 21. Emisión en el año 2012 considerando el promedio ponderado en contenido de azufre

Combustible	Gg	Contenido de azufre promedio	Azufre promedio emitido a la atmósfera (Mg)	% Emisión
Gas licuado	8,861	14	121	0.02
Queroseno (Turbosina)	2,761	419	1,156	0.16
Diesel	12,583	414	5,211	0.70
Diesel UBA	6,688	6	41	0.01
Magna	26,853	740	19,865	2.68
Magna UBA	4,794	43	208	0.03
Premium	3,088	25	78	0.01
Combustóleo	12,500	4	495,775	66.96
Coque	4,358	5	217,914	29.43
	82,487	Total	740,369	100.00
		SO₂ (Mg)	1,480,737	

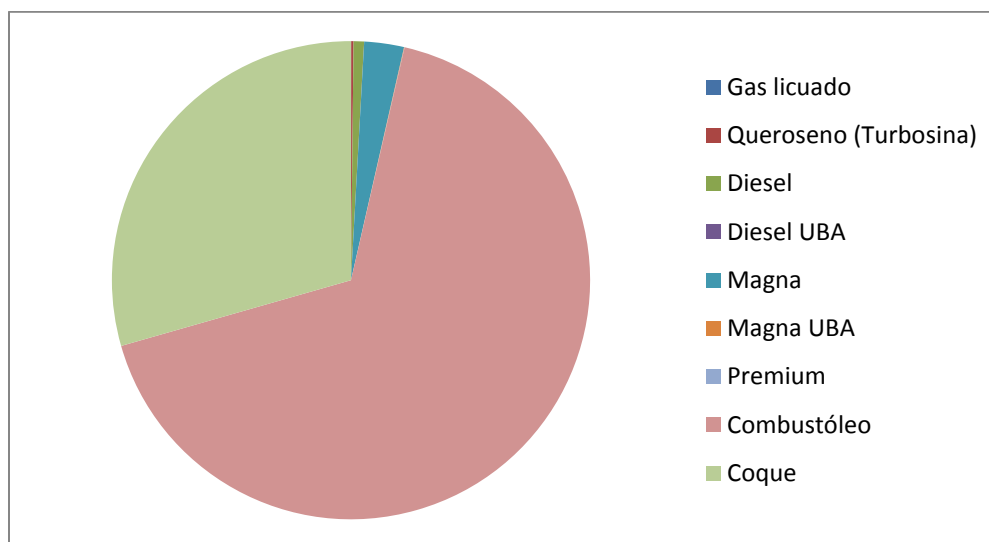


Figura 14. Contribuciones porcentuales de emisión durante el año 2012 considerando el promedio ponderado de contenido de azufre.

Con los casos de estudio planteados en la metodología (tabla 1) se calcularon las emisiones de azufre al año 2030, en forma de SO₂, bajo las siguientes consideraciones:

- La masa de gasolinas consumidas aumenta 3% al año entre 2012 y 2030.
- La masa de Diesel consumido aumenta 2.9% al año entre 2012 y 2030.

- La masa de combustibles que no son gasolinas ni Diesel permanece constante en el periodo comprendido entre 2012 y 2030.
- Los contenidos de azufre no especificados en los casos de estudio son iguales a los contenidos promedio del año 2012.

Las cantidades totales de azufre emitido en forma de SO₂ para cada caso pueden verse en la tabla 22.

Tabla 22. Azufre emitido a la atmósfera por cada caso de estudio

Combustible	Gg 2030	% Consumo	Azufre emitido (Mg)			
			Caso base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Gas licuado	8,861	7.39	121	121	121	121
Queroseno (Turbosina)	2,761	2.30	1,156	1,156	1,156	1,156
Diesel	21,050	17.56	8,717	8,717	316	316
Diesel UBA	11,189	9.34	69	69	69	69
Magna	45,715	38.14	33,819	1,371	1,371	457
Magna UBA	8,161	6.81	353	245	245	82
Premium	5,258	4.39	133	133	133	133
Combustóleo	12,500	10.43	495,775	495,775	495,775	495,775
Coque	4,358	3.64	217,914	217,914	217,914	217,914
		Total	758,057	725,502	717,100	716,023
		SO₂ (Mg)	1,516,115	1,451,004	1,434,201	1,432,046

Con las masas totales obtenidas para cada caso (detalladas en la tabla) se calculó el beneficio obtenido con la hoja de cálculo “Benefits calculator_Mexico_v1.7”. Los datos de entrada requeridos para el cálculo son:

- La emisión total de SO₂ del año 2012, en kilo-toneladas (kt).
- La emisión calculada total de SO₂ en kilo-toneladas (kt) del año 2030 bajo el supuesto de que el contenido de azufre permanece igual en todos los combustibles.
- La emisión calculada total de SO₂ del año 2030 en kilo-toneladas para cada caso, especificado en la tabla 22.

Los resultados se muestran en la tabla 23. La población considerada al año 2030 es de 131,478,659 habitantes.

Tabla 23. Beneficio en reducción de muertes prematuras por año para cada caso de estudio.

Caso	Disminución de azufre con respecto al caso base (%)	Beneficio*
1	3.91	124
2	4.92	156
3	5.05	160

*Considerando el total de la población al año 2030.

7. Análisis de resultados

En la tabla 13 puede observarse que la mayor energía consumida durante el año 2012 fue obtenida de la gasolina Magna (su consumo representa el 33.13% del consumo de energía total al año), seguida por el Diesel (15.29%) y por el Combustóleo (14.04%).

El consumo de gasolinas de bajos niveles de azufre (Magna UBA y Premium) en el año 2012 fue mucho menor que el consumo de gasolina con niveles altos de azufre (gasolina Magna), puesto que la gasolina Magna UBA sólo se distribuye en las zonas metropolitanas más importantes del país. Por cada tanque de gasolina Magna UBA se produjeron 8.6 de gasolina Premium y 5.59 de gasolina Magna.

También el consumo de Diesel UBA es menor que el de Diesel, aunque la diferencia no es tan grande como en el caso de las gasolinas. Por cada tanque de Diesel UBA se produjeron 1.88 tanques de Diesel.

En las tablas 15 y 16 puede observarse la variación del peso específico y del azufre que existe entre los diferentes productos petrolíferos de las seis refinerías del SNR. En cuanto al peso específico, la mayor diferencia se registra en el gas licuado, cuyo valor máximo (0.5535, refinería Salamanca) difiere de su valor mínimo (0.5138, refinería Madero) en un 7.73%; la gasolina Premium se acerca también a esta diferencia. Su valor máximo de peso específico (0.7481, refinería Salamanca) dista de su valor mínimo (0.6988, refinería Minatitlán) en un 7.05%. El producto con menor diferencia entre sus valores de peso específico es la turbosina. Su máximo peso específico (0.7941, refinería Tula) es sólo 1.74% mayor que el valor mínimo (0.7805, Minatitlán). El contenido de azufre fue mucho más variable. El valor máximo para la turbosina (2205 ppm, refinería Salamanca) es más de 500 veces mayor que su valor menor (4 ppm, refinería Salina Cruz). De cualquier modo, todos los valores están por debajo del límite máximo de contenido de azufre para la turbosina (3000 ppm). Le sigue en diferencia el gas licuado, cuyo valor mayor (17 ppm, refinería Cadereyta) es 8.5 veces mayor que su valor menor (2, refinería Madero). La diferencia menor está dada entre el mayor y el menor contenido de azufre de la gasolina Magna UBA (45 ppm, refinería Salamanca y 41 ppm, refinería Cadereyta, respectivamente). El mayor contenido de azufre es 1.1 veces más grande que el menor.

Puede observarse también en ambas tablas que la producción de Magna UBA en el 2012 sólo se dio en las refinerías de Cadereyta y Salamanca. El Diesel UBA, en cambio, se produce en todas las refinerías, exceptuando a Salina Cruz.

Según los datos de la tabla 17, Salamanca fue la refinería que produjo mayor cantidad de tanques durante el 2012, con la cantidad de 1814 tanques. Le siguieron Tula, con 1670 y Cadereyta, con 1329. La refinería con menor producción de tanques fue Minatitlán, con 1068.

La refinería con mayor producción de Diesel en el 2012 fue Cadereyta. Produjo 395 tanques, lo que representó el 29.72% de su producción total, siendo su producto principal durante ese año. En el mismo 2012, la refinería con mayor producción de Diesel UBA fue Salina Cruz, con 331 tanques. La producción de Diesel UBA representa el 30.99% de la producción de Salina Cruz, siendo el Diesel UBA su producto más importante durante ése año.

La refinería con mayor producción de gasolina Magna fue Salina Cruz, con 439 tanques, el 34.92% de su producción total, siendo esta gasolina su principal petrolífero producido en el 2012. El primer lugar en producción de gasolina Premium, en dicho año, correspondió a la refinería Salamanca, con 77 tanques; sin embargo, esta gasolina sólo representa el 4.24% de su producción total. La gasolina Magna UBA que produjo Salamanca en 2012, alcanzó la cifra de 227 tanques, el 59.74% de la producción total, consolidando a esta refinería como el mayor productor de ese petrolífero durante ese año en el país.

De acuerdo a la tabla 18, todos los petrolíferos producidos por el SNR durante el año 2012 están por debajo de su correspondiente límite máximo permitido de azufre, a excepción de la gasolina Magna UBA, que presenta un contenido promedio de 43 ppm, siendo su límite máximo permitido 30 ppm (promedio mensual, aunque se aceptan tanques que tengan hasta 80 ppm), rebasando la especificación en un 43.33%. El contenido promedio de azufre en el Diesel UBA, en cambio, es 60% menor al límite máximo permitido; el de la gasolina Magna es 26% menor, el de Diesel 17.2% y el de la gasolina Premium 16.67%.

El petrolífero con menor contenido promedio de azufre y con un límite más estricto es el Diesel UBA, que en promedio tiene 6 ppm de azufre, y cuyo límite máximo permitido es 15 ppm.

Puede observarse en la tabla 19 y en la figura 12 que el consumo de combustibles para fuentes móviles (Diesel, Diesel UBA, Magna, Magna UBA y Premium) representa el 65.46% del consumo de petrolíferos, siendo el combustible más empleado la gasolina Magna (32.55%), seguido del Diesel (15.25%). El combustible menos empleado durante el año 2012 fue la Turbosina (3.35% del consumo total).

En la tabla 20 y la figura 13 puede verse que bajo el supuesto de que el contenido de azufre en cada petrolífero es igual a su límite máximo permitido, el mayor

porcentaje de azufre emitido a la atmósfera proviene del combustóleo, con 65.71%, a pesar de que su consumo en masa sólo representa el 15.15% del total. Le sigue el coque, con 28.64% de las emisiones de azufre, siendo su consumo en masa sólo el 5.28% del total. Descartando esas dos emisiones, la mayor cantidad de SO₂ liberado a la atmósfera proviene de la gasolina Magna, con un 3.53%. El panorama no cambia mucho cuando se realiza el cálculo con los valores promedio de contenido azufre (tabla 21 y figura 14). El porcentaje de emisión proveniente de la quema de combustóleo sube a 66.96%, el de coque a 29.43%, y el de Magna baja a 2.68%. La emisión total de azufre se reduce en un 2.7%.

Los datos de la tabla 22 muestran que a pesar del aumento en el consumo de gasolinas y Diesel en los próximos años las emisiones de SO₂ disminuyen en los tres casos de estudio. El primer caso presenta una disminución del 4.78%, el segundo de 5.79% y el tercero de 5.91%.

Como resultados finales, puede observarse en la tabla 23 que por cada unidad porcentual en la disminución de emisiones de azufre se salvan de sufrir muerte prematura 31 personas al año, por el total de la población del país.

8. Conclusiones y recomendaciones.

De acuerdo a los resultados de la tabla 1, reducir el contenido promedio de la gasolina Magna a 30 ppm (caso 1) evitaría 124 muertes prematuras; reducir el contenido promedio de azufre de la gasolina Magna a 30 ppm y el de Diesel a 15 ppm (caso 2) evitaría 156 muertes prematuras; por último, reducir el contenido promedio de azufre de la gasolina Magna (caso 3) a 10 ppm y el de Diesel a 15 ppm evitaría 160 muertes prematuras, además de los beneficios que se obtendrían en la reducción de emisiones de otros contaminantes (HC, CO y NO_x) al conseguir una mejoría en el funcionamiento de los sistemas catalizadores.

Al comparar estos resultados con los del estudio mencionado en la sección “Evaluación de Beneficios”, se puede concluir que la reducción de contenido de azufre en gasolinas y Diesel representaría, por sí misma, de un 6.1 a un 7.8% del beneficio total calculado para las medidas de control en el sector transporte, por lo que es una medida que vale la pena adoptar.

Con estos datos, se acepta la hipótesis de que la reducción en el contenido de azufre en gasolinas y Diesel de su nivel actual al contenido de categoría “Ultra Bajo Azufre” representaría una disminución importante en la cantidad de muertes prematuras en el país al año 2030.

El escenario con mayor impacto relativo es el caso 1, debido a que la gasolina Magna es el combustible de mayor consumo en el país, y, considerando sólo gasolinas y Diesel, es también el combustible con mayor contenido promedio de

azufre: tiene 1.78 veces más azufre que el Diesel regular, que es el que le sigue en contenido promedio de azufre.

Reducir el contenido promedio de azufre en gasolina Magna de 740 ppm a 30 ppm evitaría 124 muertes prematuras; reducirla hasta 10 ppm evitaría 128. La reducción del contenido promedio de azufre en Diesel a 15 ppm evitaría 32 muertes prematuras; la reducción del contenido de azufre promedio en gasolina Magna hasta 10 ppm no tiene un impacto notablemente más amplio que la reducción a 30 ppm. Teniendo en cuenta esto, se concluye que el caso más recomendable a implementar es el caso 2, seguido por el caso 1. La ejecución de uno u otro caso, por supuesto, conlleva exigencias económicas que es recomendable que sean evaluadas.

Teniendo en cuenta que el combustóleo representa también un amplio porcentaje del consumo total de combustibles fósiles, y es el principal responsable de la emisión de dióxido de azufre, es necesario también buscar e implementar opciones tecnológicas que reduzcan su contenido promedio, o asegurarse de que sus condiciones de combustión estén más controladas.

Es recomendable también que se mejore el proceso de producción de gasolina UBA para hacer que su contenido promedio de azufre sea igual o menor a 30 ppm.

9. Referencias

AECC, *Response by AECC to European Commission consultation on the need to reduce the sulphur content of petrol & Diesel fuels below 50 parts per million*, Association for Emissions Control by Catalyst, Bruselas, 2000.

AECC, *Quality of european gasoline and Diesel fuels*, Association for Emissions Control by Catalyst, Bruselas, 2003.

Ahlvik, P. *A comparison of two gasoline and two Diesel cars with varying emission control technologies*, artículo presentado en la 8° Conferencia de Reducción de Emisiones en Máquinaria de Diesel, San Diego, California, 2002.

Ahlvik, P., *Environmental and health impact from modern cars, a comparison between two petrol and two Diesel cars with varying emission control technology*, consultado el 28 de agosto de 2014 en http://publikationswebbutik.vv.se/upload/1885/2002_62_Environmental_and_health_impact_from_modern_cars.pdf

Alcántar González, F. S., Cruz Gómez, M. Javier, *Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SO_x, y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación*, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 2011.

Anurag, B. N. S., Sarkar, P. y Reddy R. L., *Sustainable Development in the field of automóbiles with low sulfur fuels*, INPRESSCO, consultado el 26 de Agosto de 2014 en <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2014/07/Paper632635-26381.pdf>

Blumberg, K.O., Walsh, M. P., Pera, C., *Gasolina y Diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*, 2003.

Borja-Aburto VH, M. Castillejos, DR. Gold, S. Bierzwinski y D. Loomis, *Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995*, consultado el 25 de Agosto de 2014 en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1533229/?page=1>

Boulter, P. G., Latham, S., *Emission factors 2009: Report 5- a review of the effects of fuel properties on road vehicle emissions*, TRL Limited, consultado el 25 de Agosto de 2014 en https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/4251/report-5.pdf

Calvert J. G., et al, *Achieving acceptable air quality- some reflections on controlling vehicle emissions*, Science 261, 1993.

CARB, *Risk reduction plan to reduce particulate matter emissions from Diesel-fueled engines and vehicles*, California Air Resources Board, Sacramento, 2000.

Cesar, H., X. Olsthoorn, et al., *Improving air quality in metropolitan Mexico City: an economic valuation*, World Bank, consultado el 25 de agosto de 2014 en <http://www.idrc.ca/EN/Documents/prwp-improving-air-quality-metropolitan-mexico-city.pdf>

Colville, R. N., et al, *The transport sector as a source of air pollution*, Atmospheric Environment 35, consultado el 26 de Agosto de 2014 en http://eprints.ucl.ac.uk/894/1/Millennium_rvw_final_october.pdf

CONAPO, *Proyecciones de la Población de México: 2005-2050*, Consejo Nacional de Población, consultado el 26 de agosto de 2014 en <http://www.portal.conapo.gob.mx/00cifras/proy/Proy05-50.pdf>

Darlington T., D. Kahlbaum, Heiken, J. G., *Nationwide and State-by-State benefits of a gasoline sulfur limit*, Novi: Air Improvement resource, Inc., 1999.

Diegel, S. W., Davis, S., C., *Transportation Energy Databook*, Diane Publishing, United States, 2002.

EIA, *The transition to ultralow-sulfur Diesel fuel: effects on prices and supply*, Energy Information Administration, Washington, D.C., 2001

EPA, *Air quality trends report through 2010*, Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2001.

EPA, *Diesel retrofit technology and program experience*, consultado el 25 de Agosto de 2014 en <http://www.epa.gov/Diesel/documents/retrofit-tech-prog-exp.07-2005.pdf>

EPA, *Regulatory Impact Analysis- Control of air pollution from new motor vehicles: Tier 2 motor vehicle emissions standards and gasoline sulfur control requirements*, Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1999.

EPA, *Technical support document Control of emissions of hazardous air pollutants from motor vehicles and motor vehicle fuels*. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2000.

EPA, *Regulatory Impact Analysis: heavy-duty engine and vehicle standards and highway Diesel fuel sulfur control requirements*. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2000.

Fredriksson, M., et al, *Impact of a 10 ppm sulphur specification for transport fuels on the refining industry*, Bruselas, 2000.

Jacob, D.J., *Introduction to atmospheric chemistry*, Princeton: Princeton University, 1999.

Kittelson, D. B., *Engines and nanoparticles: a review*, Journal of Aerosol Science 29: 575-588, 1998.

Lead, J. R., Smith E., *Environmental and Human Health Impacts of Nanotechnology*, John Wiley & Sons, 2009.

Manahan, S., E., *Introducción a la Química Ambiental*, Reverté, México, 2006.

MECA, *The impact of gasoline fuel sulfur on catalytic emission control systems*, Manufacturers of Emission Controls Association, Washington, D.C., 1998.

Mckinley, G., Zuk, M., *Quantification of local and global benefits from air pollution control in Mexico City*, Environment Science Technology 39: 1954-1961, 2005.

Mugica, V., Ortiz, E., Molina, L., et al. *PM composition and source reconciliation in Mexico City*, Elsevier, 2009.

Parks, J. et al, 2002, *Durability of NOx adsorbers*, artículo presentado en la 8° Conferencia de Reducción de Emisiones en Máquinaria de Diesel, San Diego, California, 2002.

Pemex Refinación, *Calidad de combustibles, fase gasolinas (obra)*, Pemex Refinación, México, 2006.

SENER, Secretaría de Energía, Balance Nacional de Energía 2012, consultado el 26 de agosto de 2013 en [http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/Balance%20Nacional%20de%20Energia%202012%20\(Vf\).pdf](http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/Balance%20Nacional%20de%20Energia%202012%20(Vf).pdf)

SSA, Secretaría de Salud, Subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud [SSPPS], *Los 5 tipos de cáncer que más afectan a mexicanos*, 2014, consultado el 23 de agosto de 2014 en <http://www.spps.salud.gob.mx/noticias/1445-5-tipos-cancer-mas-afectan-mexicanos.html>

SEMARNAT, Norma Oficial Mexicana NOM-148-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, *Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006.

SEMARNAT, INE y PEMEX REFINACIÓN, *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles. Reducción de azufre en gasolinas y Diesel*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Pemex Refinación, 2006

SEMARNAT y SENER, *NOM-086-SEMARNAT-SENER-2005.-Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental*, México, 2005.

Stevens, G., *Quantifying the Benefits of Reducing Sulfur in México's Fuels*, Centro de Análisis de Riesgo de Harvard, Boston, 2005.

Walsh, M., *Moving toward clean vehicles and fuels, a global overview*, Air & Waste Management Association, 2009.

World Bank, *World Development Indicators 2012*, consultado el 26 de Agosto de 2014 en <http://data.worldbank.org/sites/default/files/wdi-2012-ebook.pdf>

10. Apéndices

10.1 Especificaciones de los productos de Pemex Refinación del año 2012

10.1.1 Turbosina

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---	0.7720	0.8370
Gravedad API	°API	37.0	51.0
Apariencia	---	Brillante y clara	
Destilación			
El 10% destila a:	°C		205.0
Temp. Final de ebullición	°C		300.0
Residuo de la destilación	%vol.		1.5
Pérdida de la destilación	%vol.		1.5
Temperatura de inflamación	°C	38	
Temperatura de congelación	°C		-47
Visc. Cinemática a -20°C	cSt		8.0
Calor de combustión neto	MJ/kg	42.80	
	BTU/lb	18.40	
Acidez total	mgKOH/g		0.1
Azufre total	ppm peso		3000
Azufre mercaptánico	ppm peso		30.0
Aromáticos	%vol		25.0

10.1.2 Diesel

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Destilación			
El 10% destila a:	°C		275.0
El 90% destila a:	°C		345.0
Temp. Final de ebullición	°C		
Temperatura de inflamación	°C	45	
Número de cetano	---	48	
Viscosidad cinemática	cSt	1.9	4.1
Azufre total	ppm peso		500
Aromáticos	%vol		30.0

10.1.3 Diesel UBA

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Destilación			
El 10% destila a:	°C		275.0
El 90% destila a:	°C		345.0
Temp. Final de ebullición	°C		
Temperatura de inflamación	°C	45	
Número de cetano	---	48	
Viscosidad cinemática	cSt	1.9	4.1
Azufre total	ppm peso		15
Aromáticos	%vol.		30.0
Lubricidad HFRR a 60°C	Micrones		520

10.1.4 Gasolina Magna

10.1.4.1 Gasolina Magna RP

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Azufre total	ppm peso		1000
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		
Benceno	%vol		3.0
Índice de octano	---	87.0	

10.1.4.2 Gasolina Magna UBA ZMVM

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Destilación:			
El 10% destila a:	°C		70.0
El 50% destila a:	°C	77.0	121.0
El 90% destila a:	°C		190.0
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Presión de vapor	lb/in ²	6.5	7.8

	kPa	45	54.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		25.0
Olefinas	%vol		10.0
Benceno	%vol		1.0
Índice de octano	---	87.0	
Oxígeno	%peso	1.0	2.7

10.1.4.3 Gasolina Magna UBA ZMG

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Destilación:			
El 10% destila a:	°C		70.0
El 50% destila a:	°C	77.0	121.0
El 90% destila a:	°C		190.0
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Presión de vapor	lb/in ²	6.5	7.8
	kPa	45	54.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		35.0
Olefinas	%vol		12.5
Benceno	%vol		1.0
Índice de octano	---	87.0	
Oxígeno	%peso	1.0	2.7

10.1.4.4 Gasolina Magna UBA ZMM

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		35.0

Olefinas	%vol		12.5
Benceno	%vol		1.0
Índice de octano	---	87.0	
Oxígeno	%peso	1.0	2.7

10.1.5 Gasolina Premium

10.1.5.1 Gasolina Premium RP

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		35.0
Olefinas			15.0
Benceno	%vol		2.0
Oxígeno	%peso		2.7
Índice de octano	---	91	

10.1.5.2 Gasolina Premium ZMVM

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Destilación:			
El 10% destila a:	°C		70.0
El 50% destila a:	°C	77.0	121.0
El 90% destila a:	°C		190.0
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Presión de vapor	lb/in ²	6.5	7.8
	kPa	45	54.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		25.0
Olefinas			10.0
Benceno	%vol		1.0
Oxígeno	%peso		2.7
Índice de octano	---	92	

10.1.5.3 Gasolina Premium ZMG

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Destilación:			
El 10% destila a:	°C		70.0
El 50% destila a:	°C	77.0	121.0
El 90% destila a:	°C		190.0
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Presión de vapor	lb/in ²	6.5	7.8
	kPa	45	54.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		35.0
Olefinas			12.5
Benceno	%vol		1.0
Oxígeno	%peso		2.7
Índice de octano	---	92	

10.1.5.4 Gasolina Premium ZMM

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		
Temp. Final de ebullición	°C		225.0
Residuo de la destilación	%vol.		2.0
Azufre total	ppm peso		30
Azufre mercaptánico	ppm peso		20.0
Aromáticos	%vol		35.0
Olefinas			12.5
Benceno	%vol		1.0
Oxígeno	%peso		2.7
Índice de octano	---	92	

10.1.5.5 Combustóleo

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Gravedad específica 20/4 °C	---		1.000
Temp. de inflamación	°C	66	
Viscosidad cinemática a 50°C	cSt	636	1166

Azufre total	% peso		4.0
Poder calorífico neto	MJ/kg	40	

10.1.5.6 Coque

Parámetro	Unidades	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
Azufre total	% peso		6.5
Humedad	% peso	8.0	15.0
Materia volátil	% peso	9.0	11.0
Níquel	ppm		300
Vanadio	Ppm		2000

10.2 Especificaciones de presión de vapor y destilación para gasolinas

10.2.1 Magna y Premium RP

Clase de volatilidad	PV	PV	Dest. 10%	Dest. 50%		Dest. 90%
	lb/in ²	kPa		°C		
			Máx.	Mín	Máx	Máx
A	7.8-9.0	54.0-62.0	70.0	77.0	121.0	190.0
B	9.0-10.0	62.0-69.0	65.0		118.0	
C	10.0-11.5	69.0-79.0	60.0		116.0	

10.2.2 Magna ZMVM y ZMG; Premium ZMVM y ZMG

Clase de volatilidad	PV	PV	Dest. 10%	Dest. 50%		Dest. 90%
	lb/in ²	kPa		°C		
			Máx.	Mín	Máx	Máx
AA	6.5-7.8	45-54.0	70.0	77.0	121.0	190.0

10.2.3 Magna y Premium ZMM

Clase de volatilidad	PV	PV	Dest. 10%	Dest. 50%		Dest. 90%
	lb/in ²	kPa		°C		
			Máx.	Mín	Máx	Máx
B	9.0-10.0	62.0-69.0	65.0	77.0	118.0	
C	10.0-11.5	69.0-79.0	60.0		116.0	185.0

10.3 Protección contra el sello de vapor en gasolinas

10.3.1 Magna y Premium RP

Protección contra el sello de vapor (vapor lock) Clasificación	Relación Vapor/Líquido (V/L)	
	Temperatura de prueba mínima (°C)	Relación V/L Constante
1	60	20
2	56	
3	51	

10.3.2 Magna ZMVM, ZMG y ZMM; Premium ZMVM, ZMG y ZMM.

Protección contra el sello de vapor (vapor lock) Clasificación	Relación Vapor/Líquido (V/L)	
	Temperatura de prueba mínima (°C)	Relación V/L Constante
2	56	20
3	51	

10.4 Volatilidad de gasolinas por época del año.

10.4.1 Magna y Premium RP

Mes	Refinería					
	Cadereyta Nuevo León	Cd. Madero Tamaulipas	Minatitlán Veracruz	Salamanca Guanajuato	Salina Cruz Oaxaca	Tula Hidalgo
ENE	C-3	C-3	B-2	C-3	B-2	C-3
FEB	C-3	C-3	B-2	C-3	B-2	C-3
MAR	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2
ABR	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2
MAY	B-2	B-2	A-1	B-2	A-1 y B-2	B-2
JUN	A-1	A-1	A-1	A-1	A-1	A-1
JUL	A-1	A-1	A-1	A-1	A-1	A-1
AGO	A-1	A-1	A-1	A-1	A-1	A-1
SEP	B-2	B-2	A-1	B-2	A-1	B-2
OCT	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2
NOV	C-3	B-2	B-2	C-3	B-2	C-3
DIC	C-3	C-3	B-2	C-3	B-2	C-3

10.4.2 Magna ZMVM y ZMG; Premium ZMVM y ZMG

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
AA-3	AA-3	AA-2	AA-2	AA-2	AA-2	AA-3	AA-3	AA-3	AA-3	AA-3	AA-3

10.4.3 Magna y Premium ZMM

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
C-3	C-3	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2	B-2	C-3	C-3	C-3

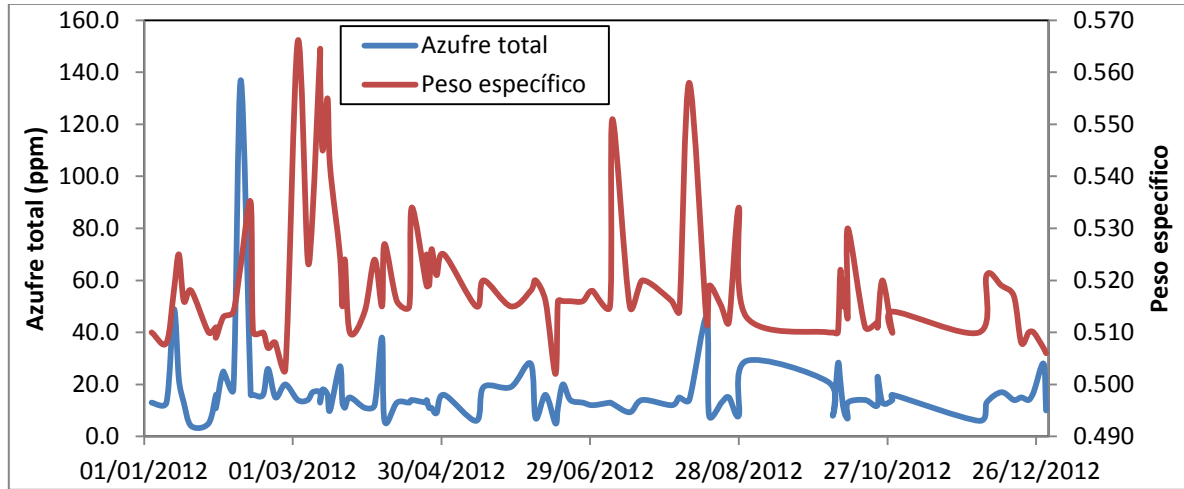
10.5 Zonas geográficas de distribución de gasolinas

Refinería	Áreas de influencia (Terminales de almacenamiento y distribución)
Cadereyta	Cadereyta, Cd. Juárez, Chihuahua, Durango, Gómez Palacio, Matehuala, San Luis Potosí, Santa Catarina, Monterrey, Nuevo Laredo, Parral, Reynosa, Sabinas, Saltillo, Monclova.
Madero	Cd. Madero, Cd. Mante, Cd. Valles, Cd. Victoria, Poza Rica, San Luis Potosí.
Minatitlán	Campeche, Escamela, Jalapa, Mérida, Minatitlán, Pajaritos, Perote, Progreso, Puebla, Tehuacán, Tierra Blanca, Veracruz, Villahermosa, Tabasco.
Salamanca	Aguascalientes, El Castillo, El Salto, Irapuato, León, Morelia, Salamanca, Uruapan, Zacatecas, Zamora, Tepic.
Salina Cruz	Acapulco, Cd. Obregón, Colima, Culiacán, Ensenada, Guamuchil, Guaymas, Hermosillo, La Paz, Lázaro Cárdenas, Magdalena, Manzanillo, Mazatlán, Mexicali, Navojoa, Nogales, Oaxaca, Rosarito, Salina Cruz, Tapachula, Topolobampo, Tuxtla Gutiérrez.
Tula	Cuautla, Cuernavaca, Iguala, Pachuca, Toluca, Tula, Celaya, Querétaro.

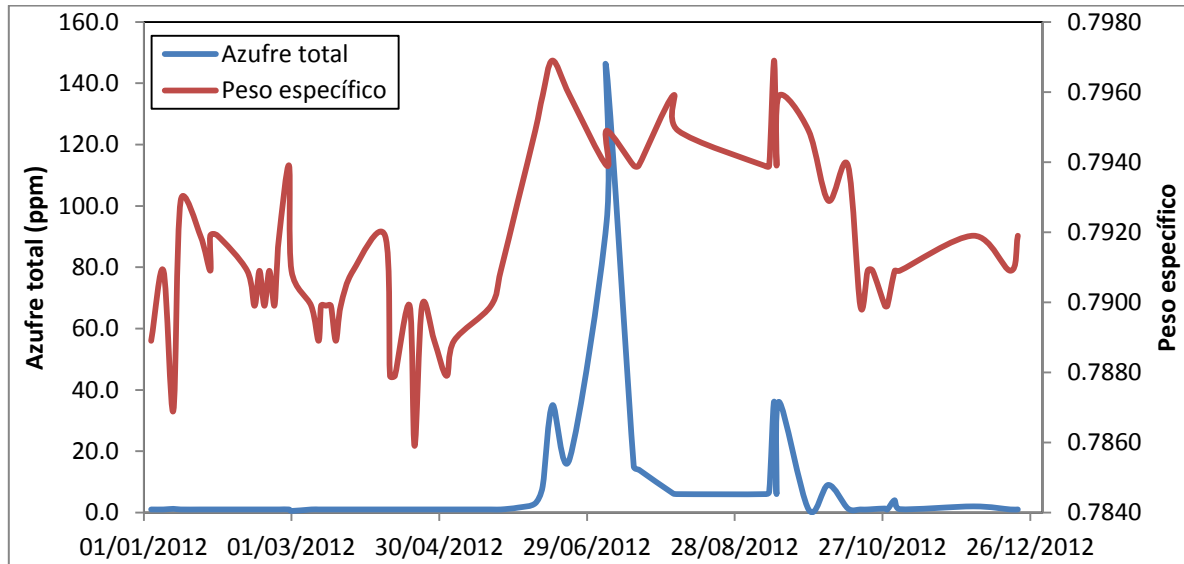
10.6 Peso específico y azufre total de los productos de Pemex Refinación en el año 2012

10.6.1 Refinería Cadereyta

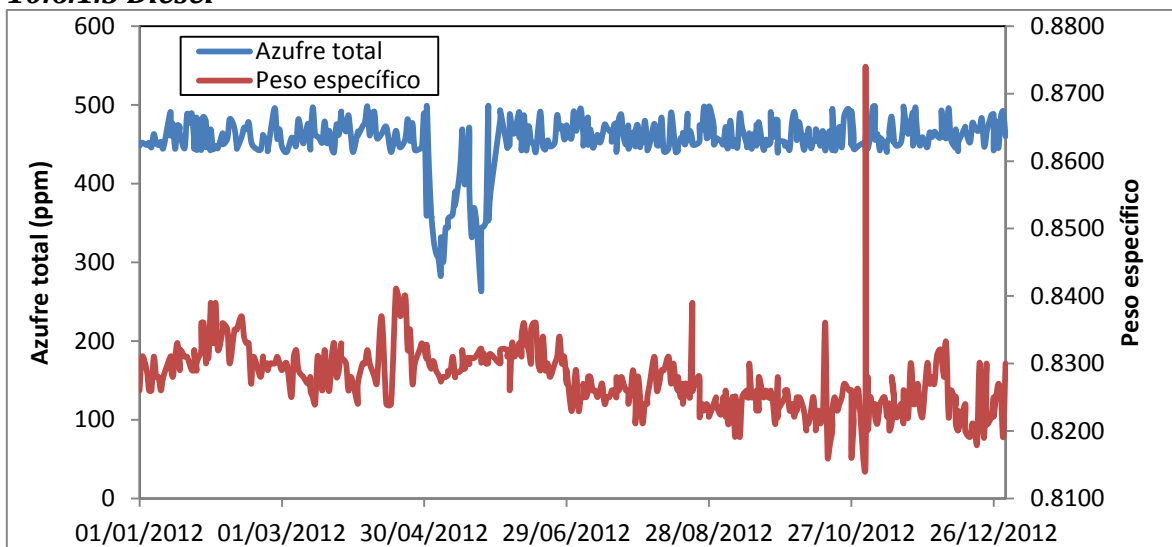
10.6.1.1 LPG



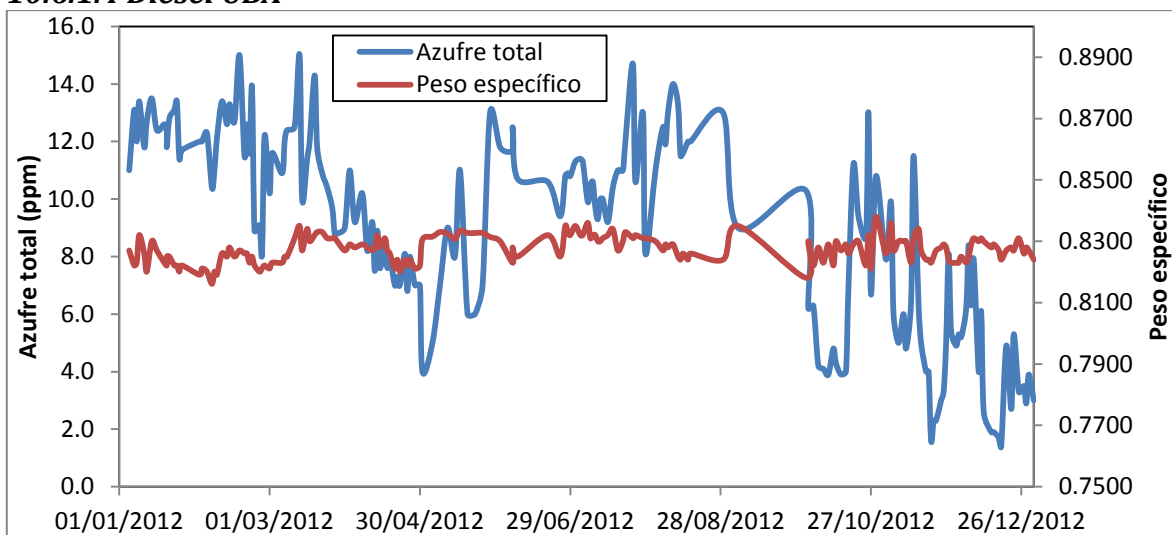
10.6.1.2 Turbosina



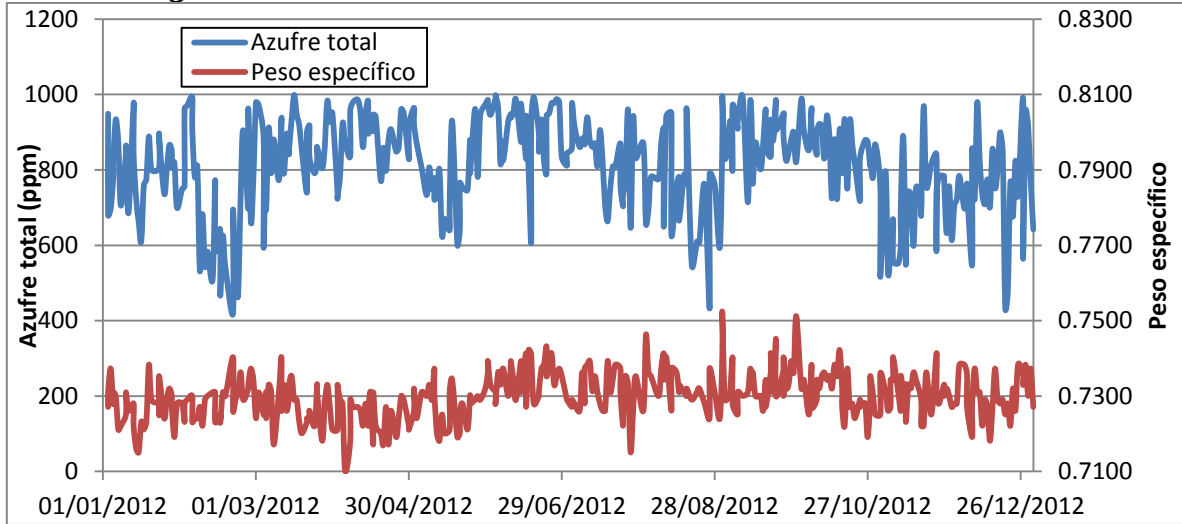
10.6.1.3 Diesel



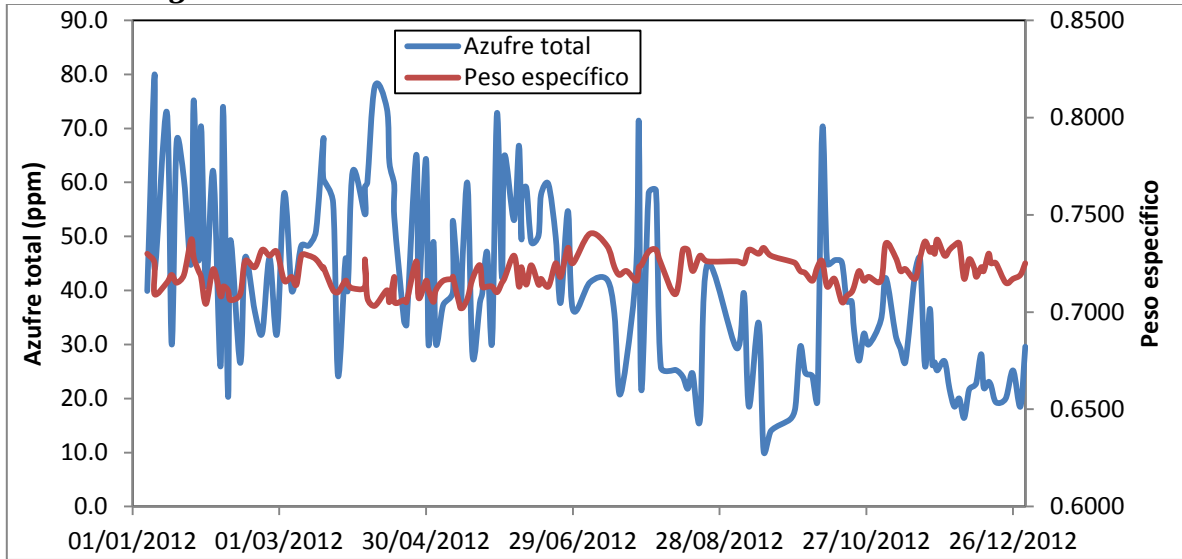
10.6.1.4 Diesel UBA



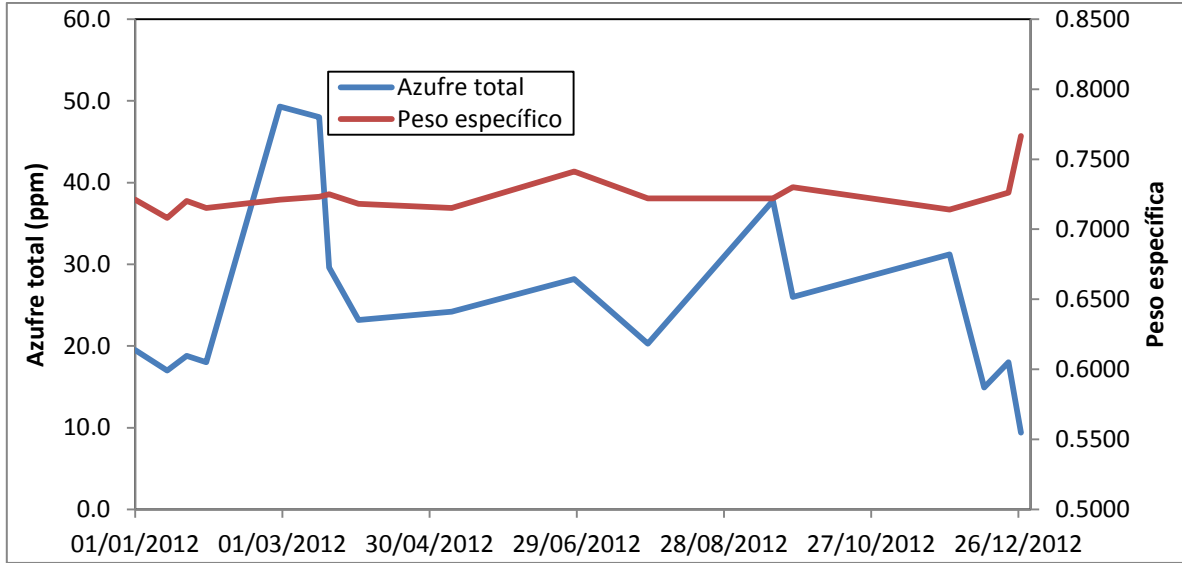
10.6.1.5 Magna



10.6.1.6 Magna UBA



10.6.1.7 Premium



10.6.1.8 Combustóleo

