

*Efecto del uso de mezclas etanol - gasolina en el desempeño mecánico, energético y ambiental de vehículos en uso*

*Dr. José Ignacio Huertas  
Ago 2022*





*Dr. José Ignacio Huertas*  
*Departamento de Ingeniería Mecánica*  
*Grupo de Investigación en Energía y Cambio*  
*Climático*  
*Escuela de Ingeniería y Ciencias*  
*Tecnológico de Monterrey*  
<https://jihuertas.com/>

### **Formación académica**

- Ingeniero Mecánico y Maestría en Ingeniería Mecánica por la Universidad de los Andes (Colombia)
- Maestría en Ciencias y Doctor en Ciencias por la Universidad de Washington (EUA)

### **Distinciones**

- Miembro del Sistema Mexicano de Investigadores SNI2 del CONACYT, y la Academia Mexicana de Ciencias
- Investigador Senior COLCIENCIAS
- 70+ artículos publicados anexados a Scopus
- 3 patentes

### **Áreas de interés**

Combustión, energía, contaminación del aire, movilidad inteligente.

---

## Energía y cambio climático

- Combustibles
- Biocombustibles
- Energías renovables
  
- Procesos de combustión
- Desempeño de motores
- Desempeño mecánico y ambiental de vehículos
- Eficiencia energética
  
- Medición de emisiones contaminantes
- Inventarios de emisiones
  
- Modelación de la dispersión de contaminantes en el aire
- Análisis de mecánica de fluidos computarizada CFD
  
- Fundamentos científicos para política pública



## Cases of study



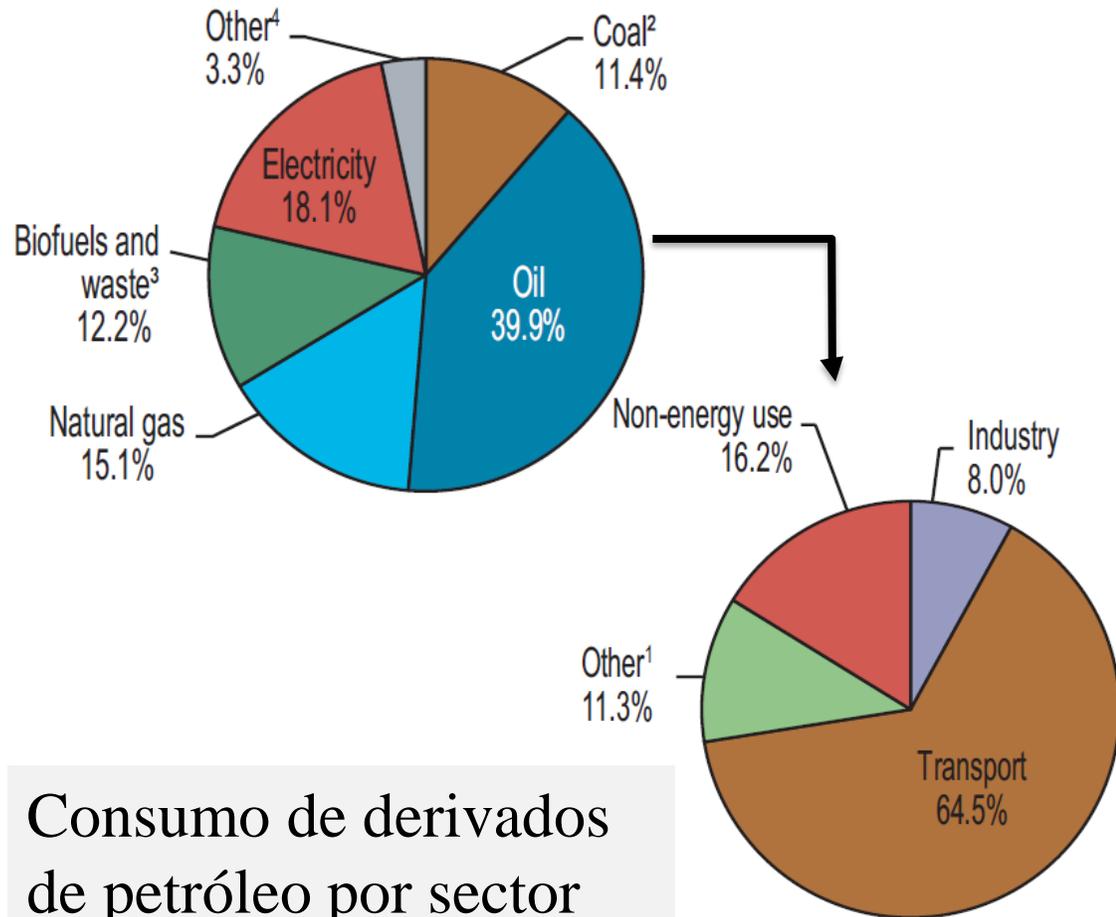
- Transmilenio: Diesel vs Natural Gas
- Policia metropolitana de Bogotá: Vehicles converted from gasoline to natural gas
- Ciudad limpia: Vehicles converted from diesel to natural gas
- GM: Use of ethanol blends
- BMW: Mini E
- MOPESA: Biogas as fuel for engines
- Macimex: crankshaft testing
- Flecha Roja: Power train optimization
- Ford: Enhanced HVAC system
- Logyca + Corona: Freight transportation in Colombia
- Femsa: Reducing fuel consumption by reducing gross vehicle weight
- SENDA: Reducing fuel consumption by improving HVAC operation



*Reducing fuel consumption  
by reducing weight in vehicles used for urban  
distribution of goods*

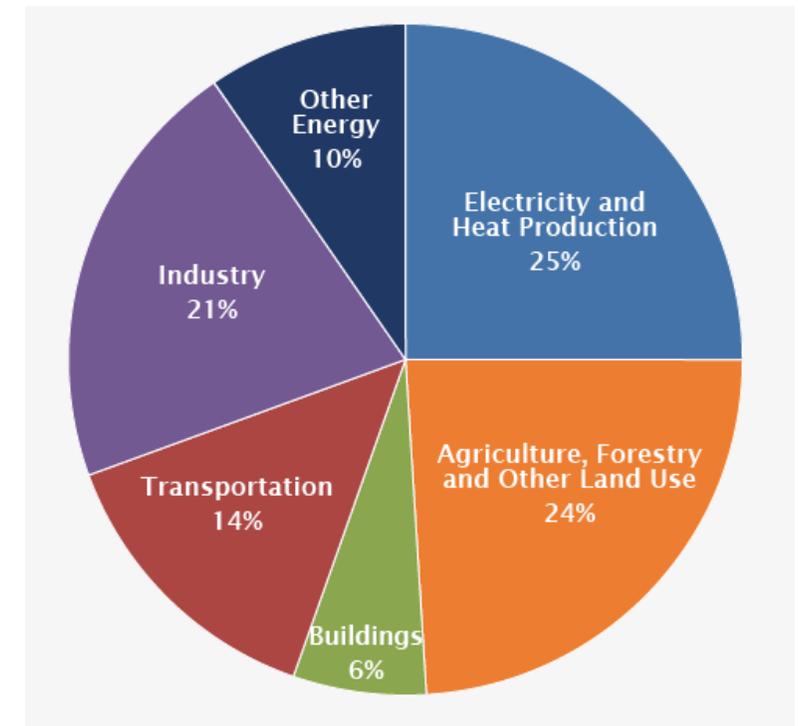


## Consumo energético por tipo de combustible



## Consumo de derivados de petróleo por sector

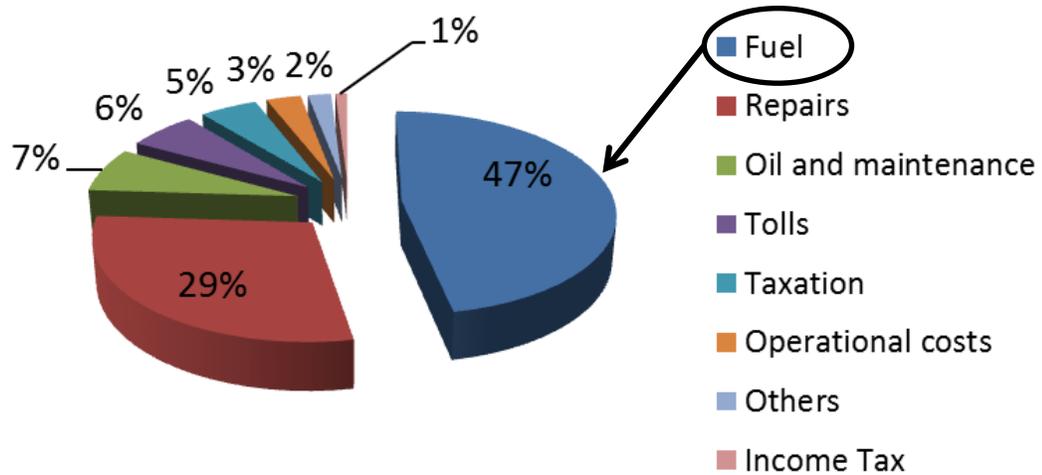
## Emisiones de CO<sub>2</sub> por sector



El sector transporte es el principal consumidor de energía y uno de los mayores aportante en las emisiones de CO<sub>2</sub>

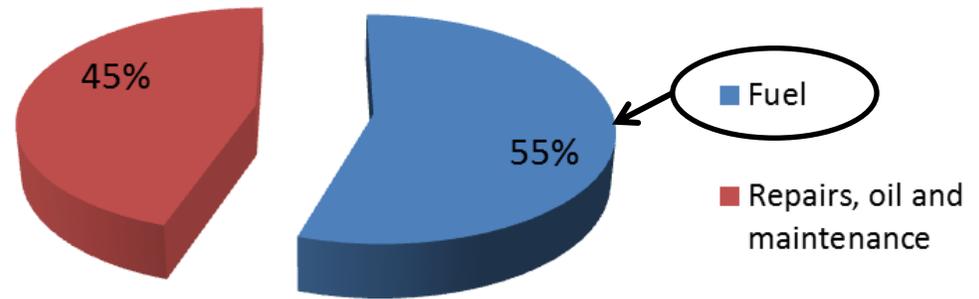
# Operative costs in transport companies

### Passenger transportation company costs



Autotransportes Azteca Toluca  
Ixtlahuaca S.A. de C.V.

### Freight transportation company costs



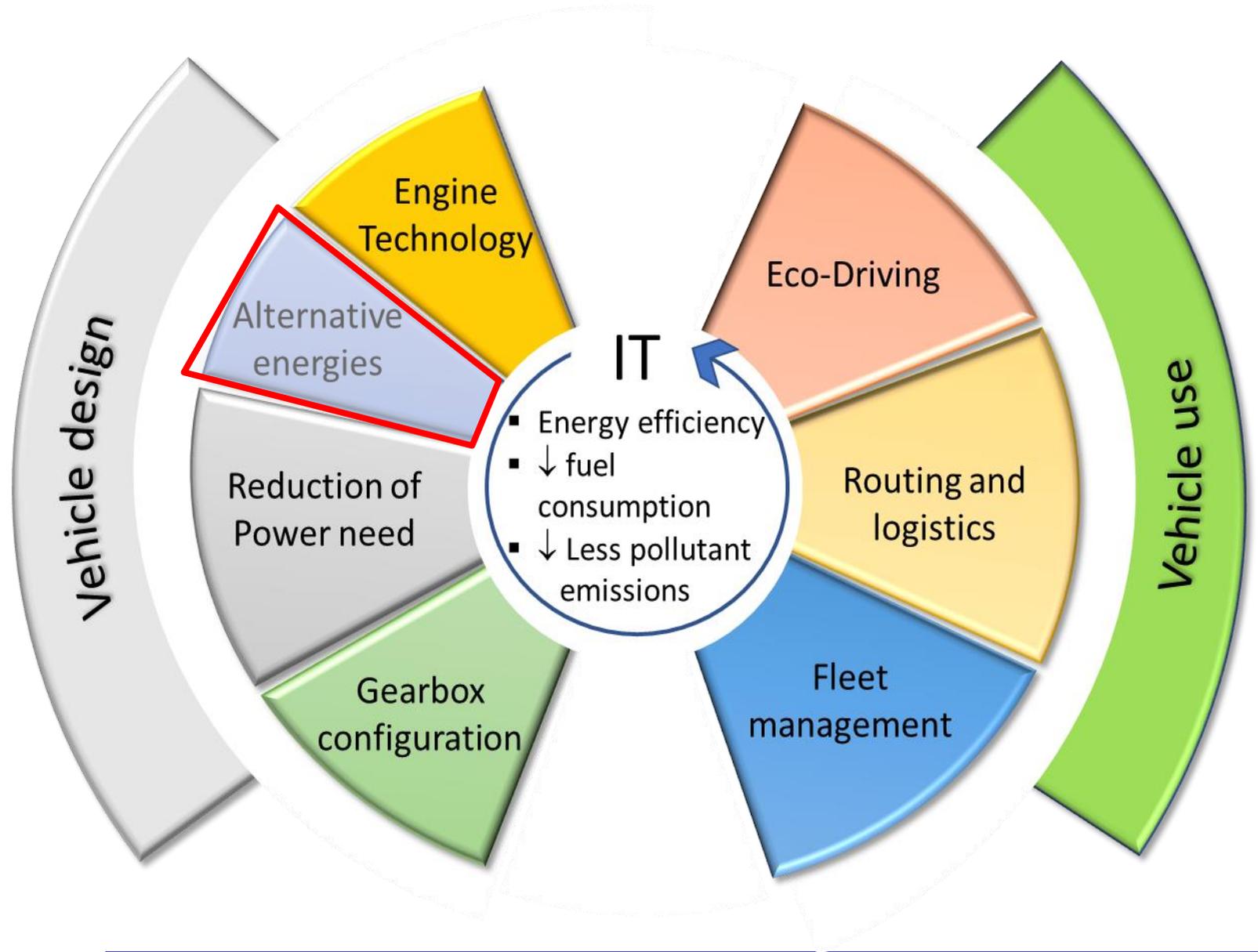
Freight transportation (FEMSA)

# Preguntas persistentes en el transporte

## Quienes

- Autoridades gubernamentales (ambiente, energía, transporte)
  - Administradores de flota de vehículos
  - Entidades internacionales
- 
- Diesel/Gasolina o Gas Natural o Biocombustibles o eléctricos
  - Como reducir consumo de combustible en flotas de transporte
    - Como reducir las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero
    - Como implementar regulación de eficiencia energética del transporte
    - Cual es el consumo y emisiones reales de los vehículos
  - Como hacer rentable el uso de mejores tecnologías
-

*Estrategias para reducir consume  
de combustible en vehículos*



## Efecto del uso de mezclas etanol - gasolina en el desempeño mecánico, energético y ambiental de **vehículos livianos** en uso

Asocaña  
Federación Nacional de Biocombustibles  
Ecopetrol  
Ministerio de Minas y Energía

PhD. Juan Esteban Tibaquirá Giraldo  
MSc. Sebastián Ospina Castro  
Dr. Luis Felipe Quirama Londoño  
MSc. José Edgardo Niño Báez  
Dr. José Ignacio Huertas

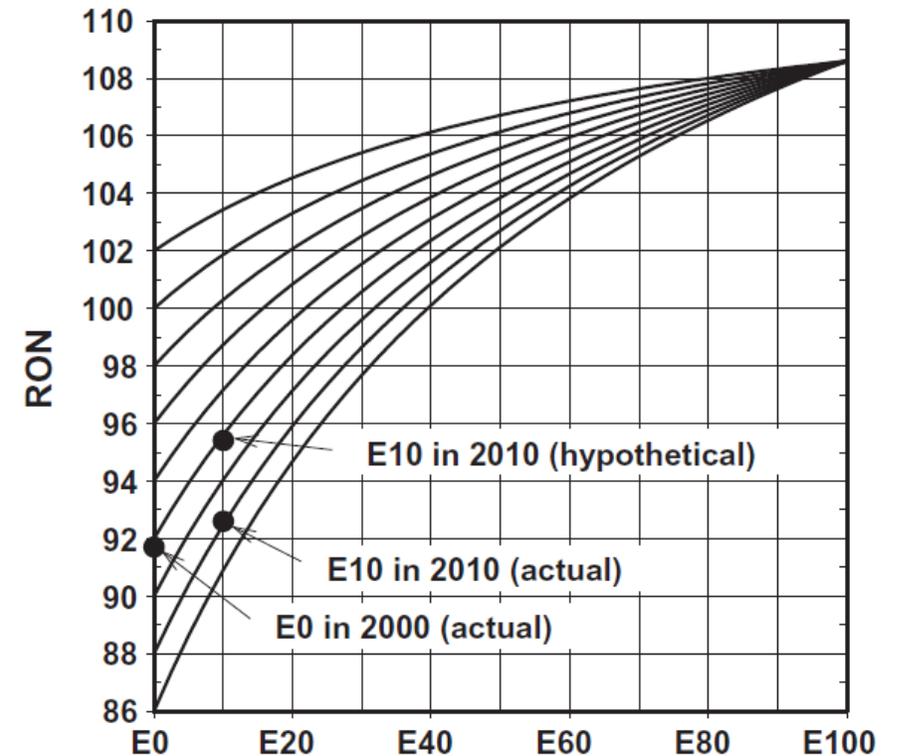
## Etanol en vehículos

### Uso de etanol en vehículos

- Reducir la dependencia de combustibles fósiles
- Reducir emisiones de CO<sub>2</sub>
- Incrementar octanaje gasolinas

### Características del etanol

- Menor poder calorífico (LHV~26.9 vs 43 MJ/kg)
- Menor relación aire – combustible (A/F=9 vs. 14.7)
- Mayor volatilidad: (RVP~16.1 vs. ~50 kPa)
- Mayor octanaje:
  - Octanaje del etanol: 99
  - Octanaje de la gasolina: 87-94
- Degrada algunos materiales poliméricos



*Octanaje de mezclas etanol - gasolina  
Fuente: Referencia [35]*

## Preocupaciones de incrementar el contenido de etanol en las gasolinas para el caso de vehículos en uso

- Actualmente se utilizan mezclas hasta E10 en vehículos en uso sin modificación de la programación de sus motores.
- Actualmente se usan mezclas E85 en vehículos de combustible flexible.
- La programación de las ECU de los vehículos no considera la presencia del etanol en la gasolina
- El consumo de combustible puede aumentar
- Puede deteriorar algunos materiales presentes en el sistema de inyección de combustible
- Puede incrementar las emisiones de VOCs

## Problemática

Cual es el efecto de **NO modificar** la programación del motor en el rendimiento mecánico, energético y ambiental en vehículos operando con mezclas etanol – gasolina?

Cual es el efecto en el potencial de formación de ozono causado por la mayor volatilidad del etanol?

## Objetivo

Evaluar analítica y experimentalmente el efecto del uso de mezclas etanol-gasolina en el desempeño mecánico, energético y ambiental de vehículos a gasolina sin reprogramación del motor.

## Alcance

Observar el efecto sobre:

- $\lambda$
- Desempeño mecánico (Potencia y torque)
- SFC
- Índices de emisión de CO<sub>2</sub>, CO, THC, NO<sub>x</sub>, y COVs
- Tendencia del potencial de formación de ozono (OFP).



# Metodología

# Metodología

1500 < RPM < 4500

0% < %TPS < 100%

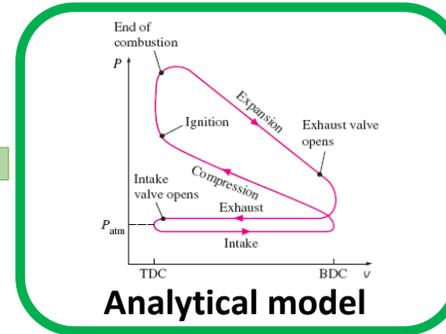
E0 y E20

0.8 <  $\lambda$  < 1.5



**Engines**

$\lambda$   
SFC  
 $\tau$   
 $\delta \dot{W}$   
EI



**Analytical model**

1000 < RPM < 5000

%TPS = 100%

E0 < E < E100

0.8 <  $\lambda$  < 1.5

Representative routes

E10 y E20

$\lambda \sim 1$

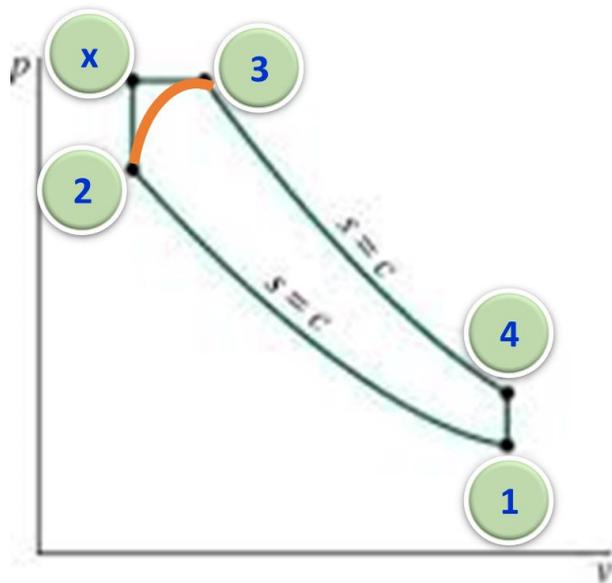


**Vehicles**

# Modelo CIMA (Motor)

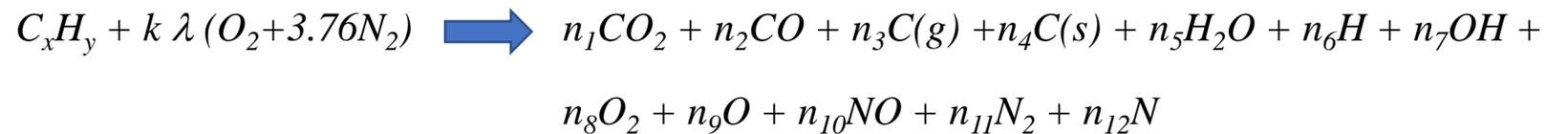
- El fluido de entrada al cilindro es aire y se asume como gas ideal
- La masa de entrada al cilindro es constante
- La presión y la temperatura es uniforme

~~$$m C_v (T_3 - T_2) = LHV m_f \eta_{comb}$$~~



$$h_3 - h_2 = \Delta PV_2$$

Conservación de la masa:



$$C: \quad x = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$$

$$H_2: \quad y/2 = n_5 + n_6/2 + n_7/2$$

$$O_2: \quad k \lambda = n_1 + n_2/2 + n_5/2 + n_7/2 + n_8 + n_9/2 + n_{10}/2$$

$$N_2: \quad 37.6 k \lambda = n_{10}/2 + n_{11} + n_{12}/2$$

## Modelo CIMA (Motor)

- Volumen constante:

$$\sum (n_i u_i)_3 - \sum (n_i u_i)_2 = 0$$

$$\alpha = \frac{P_3}{P_2}$$

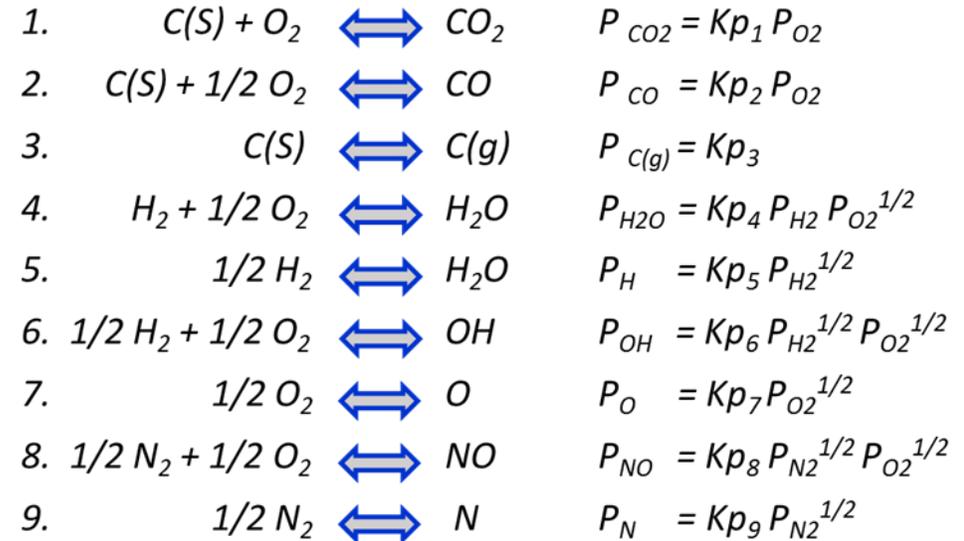
- Presión constante:

$$\sum (n_i h_i)_3 - \sum (n_i h_i)_2 = 0$$

$$\beta = \frac{v_3}{v_2}$$

$T_3$  está implícita en las ecuaciones anteriores.

## Equilibrio químico



$$P_i = (n_i / N) P$$

$$\sum P_i = P$$

## Índice de emisión

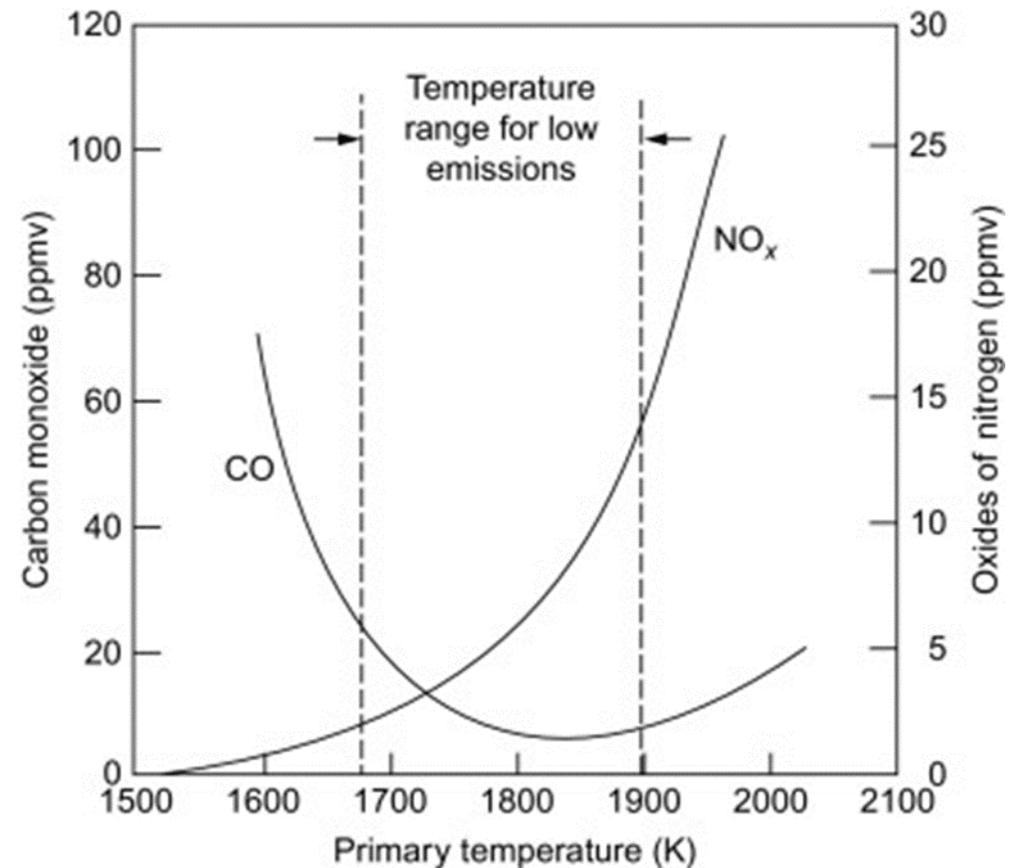
$$EI = c_i \cdot \dot{m}_f \cdot \left(1 + \left(\frac{A}{F}\right) \cdot \lambda\right) \cdot \frac{1}{d\dot{W}}$$

## Modelo CIMA (Motor)

Formación de NOx:

- $K_G$  depende fuertemente de la temperatura.
- La formación de NOx depende de la disponibilidad de oxígeno.

$$\frac{d[NO]}{dt} = K_G [N_2] [O_2]^{1/2}$$



## Modelo CIMA (Motor)

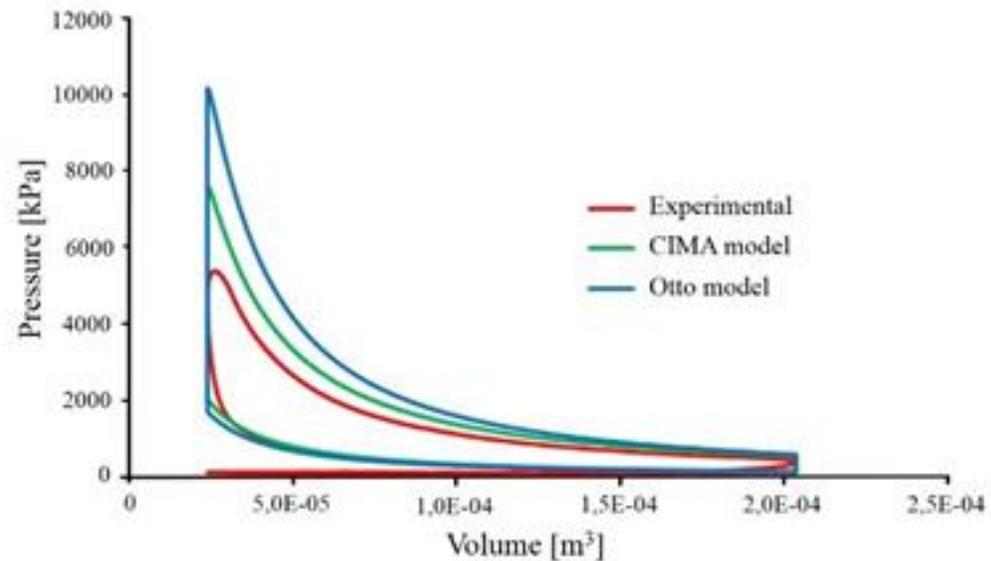


Tabla 1. Datos de entrada para cálculos analíticos

Parámetro	Iso octano	Etanol
P1 [kPa]	75	75
T1 [K]	288	288
LHV [kJ/kg]	47810	29710
Rc	9.4	9.4
AFs	15.05	8.953
$\lambda$	0.8 - 1.5	0.8 - 1.5

## Motor - experimental

	Motor 1	Motor 2
Características	Chevrolet Sail / LPDA	Chevy
Tren motriz	1,4 Liters DOHC	GM Z16SE
Desplazamiento [cm <sup>3</sup> ]	1 398	1 597
Orientación	Transversal	Longitudinal
Relación de compresión	10,2	9,4
Diámetro cilindro / Carrera	79,8 mm / 81,8 mm	-
Distribución	4 válvulas por cilindro / 2 árboles de levas	2 válvulas por cilindro / 1 árbol de levas
Sistema de combustible	Inyección directa de combustible	Inyección de combustible multipunto secuencial
Potencia / RPM	76 kW / 6000 RPM	74,5 kW / 5600 RPM
Torque / RPM	130 Nm / 4200 RPM	135,6 Nm / 3200 RPM

## Vehículos- experimental



- Sprint: **Vehículo carburado** más representativo del parque automotor colombiano
- Aveo: **Vehículo inyectado** más representativo del parque automotor colombiano

## Vehículos - experimental

Características	Chevrolet Sprint 1997	Chevrolet Aveo 2010
Tren motriz	1,0 Litros	1,6 Litros
Desplazamiento del motor [cm <sup>3</sup> ]	990	1 598
Relación de compresión del motor	8,5	9,5
Peso	690 kg	1165 kg
Sistema de combustible	Carburador	Inyección de combustible multipunto secuencial
Transmisión	Transmisión manual, 5 velocidades	Transmisión manual, 5 velocidades
Potencia / RPM	37 kW / 5100 RPM	82 kW / 6000 RPM
Torque / RPM	77 Nm / 3200 RPM	145 Nm / 3600 RPM



### *Motor 1 y vehículos (Col)*

<b>Instrumentación usada - Motor 1 y vehículos</b>
Dinamómetro Dynapack 2WD-2
Vgate OBD scan
Depósito de combustible SUM - 290122
Váscula electrónica Fenix Lexus de 6 kg
Interfaz con software LabView
Analizador de gases Galio Smart 2000X
Sonda lambda Innovate LC-1

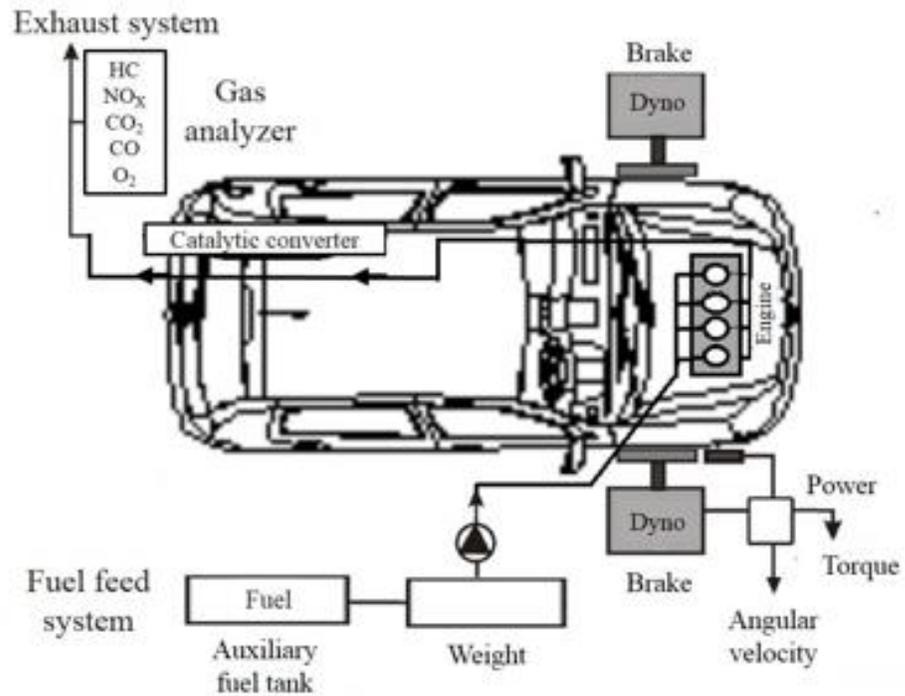


Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz

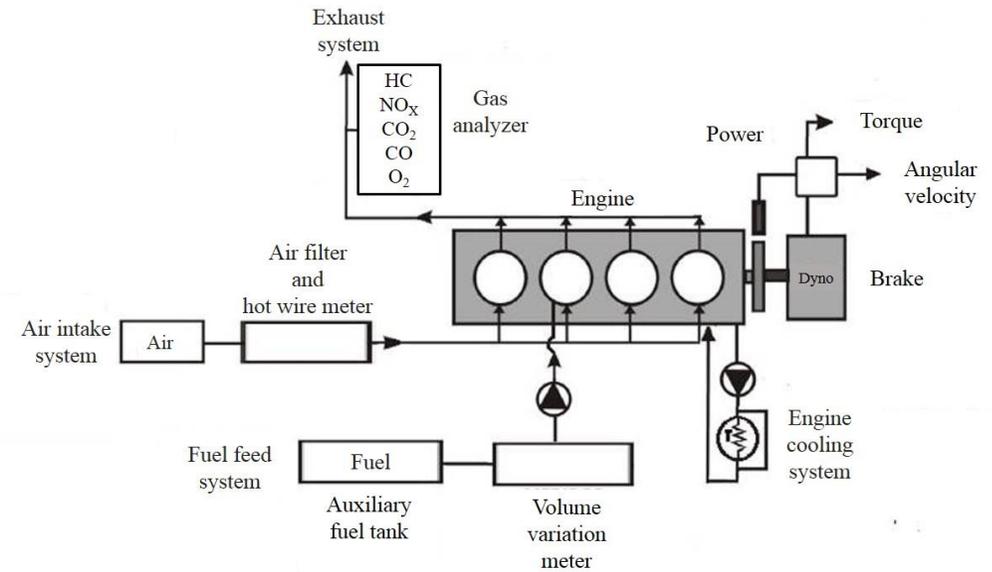
### *Motor 2 - Estado estable (Mex)*

<b>Instrumentación usada - Motor 2</b>
Dinamómetro SuperFlow SF902
ELM327 OBD scan
Tanque auxiliar
Camera DVT Legend Vision
Interfaz con software LabView
Analizador de gases infrarrojo FGA-4000XD

# Montaje- experimental



Montaje experimental motor 1 y vehículos



Montaje experimental motor 2

# Instrumentación – Analizador gases

		Lab 1			Lab 2		
Marca	Banco de pruebas de motor	Dynapack 2wd-2			SuperFlow SF902		
	Analizador de gases	Analizador de gases Galio Smart 2000X			Analizador de gases FGA 4000XD		
Variable	Método	Rango	Exactitud	Método	Rango	Exactitud	
CO	Infrarrojo	0 - 10 % V	0.06% Absoluto, 5% Relativo	Infrarrojo	0 - 10 % V	+/- 5%	
CO <sub>2</sub>	Infrarrojo	0 - 20 % V	0.03% Absoluto, 5% Relativo	Infrarrojo	0 - 20 % V	+/- 5%	
HC	Infrarrojo	0 - 2000 ppm	4 ppm Absoluto, 5% Relativo	Infrarrojo	0 - 5000 ppm	+/- 5%	
HC	Infrarrojo	2001 - 10000 ppm	5% Relativo	Infrarrojo	-	-	
O <sub>2</sub>	Infrarrojo	0 - 25 % V	+/- 2% Relativo	Infrarrojo	0 - 25 % V	+/- 5%	
NOx	Infrarrojo	0 - 1000 ppm	32 ppm Absoluto	Infrarrojo	0 - 5000 ppm	+/- 4%	
NOx	Infrarrojo	1001 - 2000 ppm	60 ppm Absoluto	Infrarrojo	-	-	

## Combustibles- Experimental

Propiedad	E0	E10	E20
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	733	739	746
LHV [kJ/kg]	43370	41600	39860
Entalpía de vaporización [kJ/kg]	349000	411000	471000
RON	88.5	90.7	94.8
MON	80.3	81.6	83.3
AKI	84.4	86.2	89.1
A/F estequiométrica	14.49	13.89	13.31

# Campaña de medición



*Ruta norte*



*Ruta centro*



*Ruta sur*



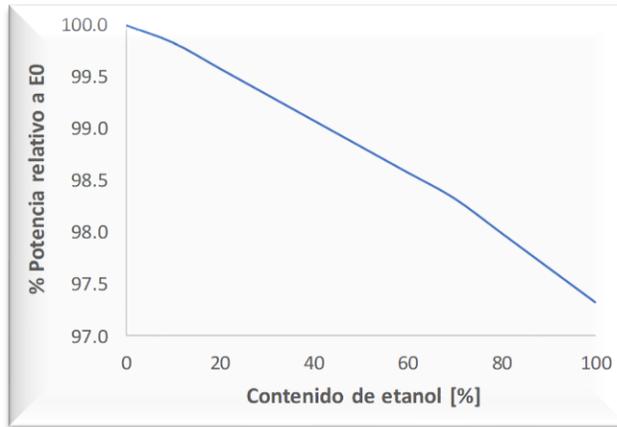
*Acumulación de distancia en dinamómetro*



## Resultados

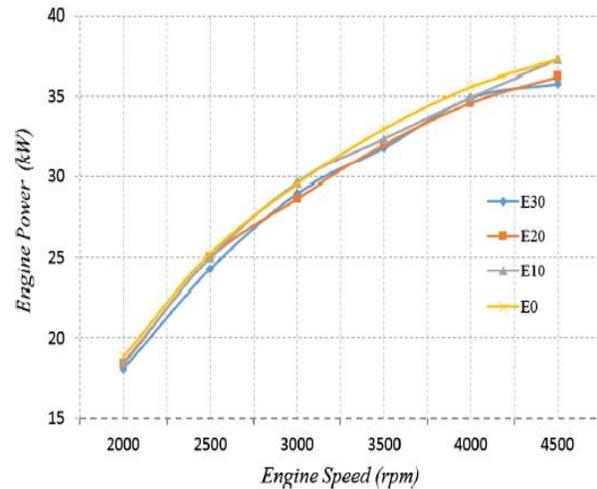
# Potencia

Análíticamente



- Análíticamente: Potencia reduce ligeramente (<3%) con el aumento del contenido de etanol

Experimentalmente



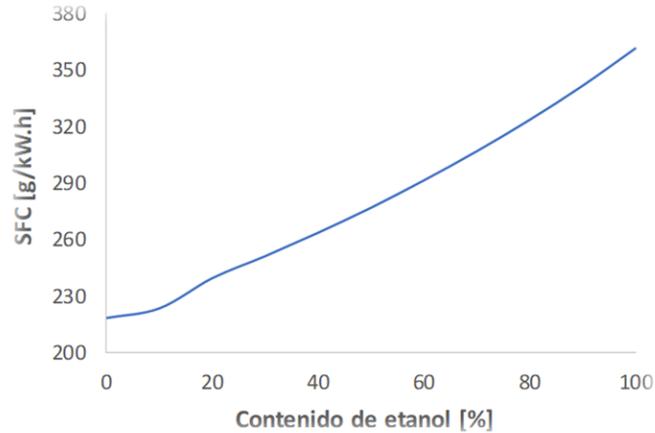
- Experimentalmente: Reducción es despreciable

Departamento de tecnología automotriz, Turquía 2017

Fuente: Referencia [4]

# Consumo de combustible en motores SFC (kg/kwh-h)

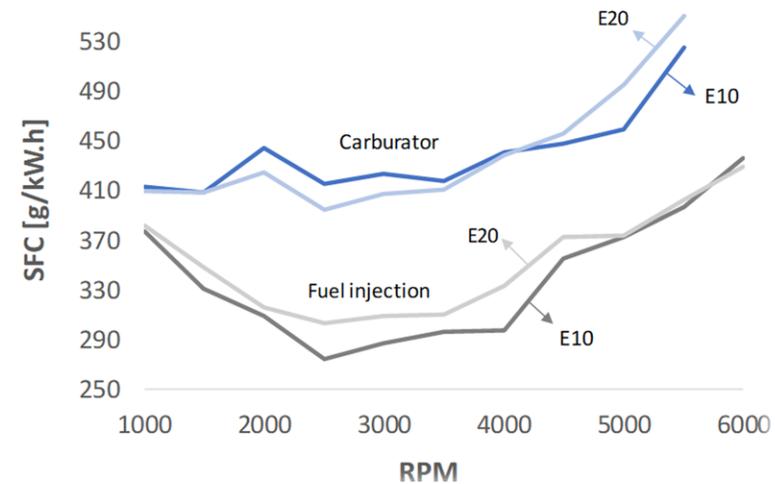
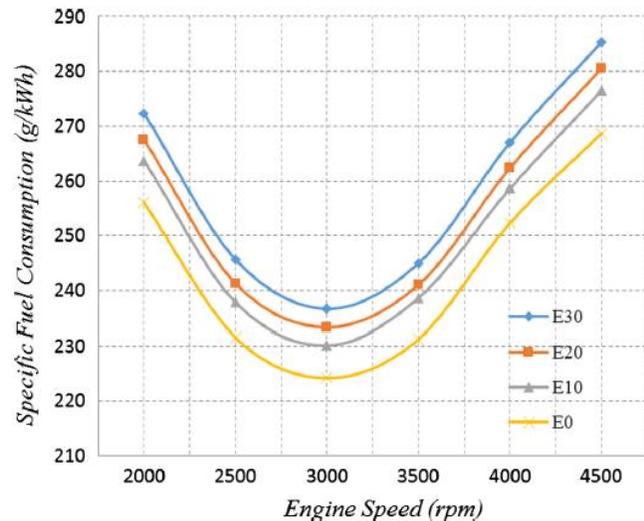
Análíticamente



Análíticamente:

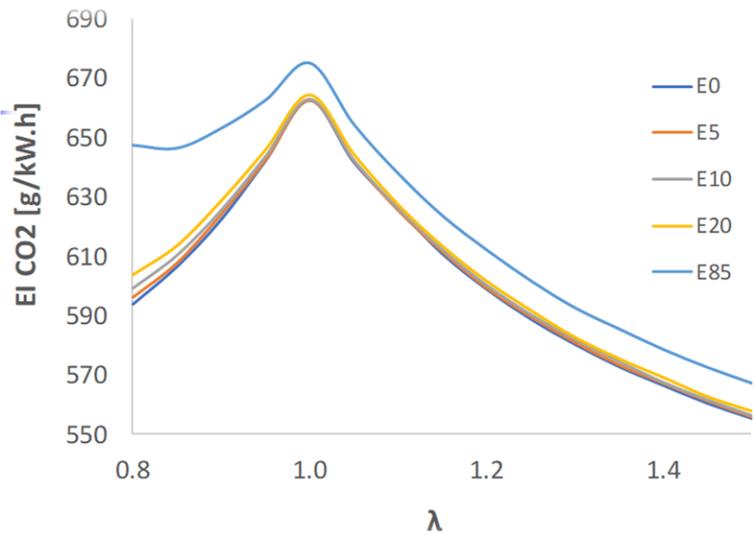
- El SFC (kg/kW-h) aumenta ~ 9.63% con E20
- El SFC puede aumentar hasta un 52.3% con E85
- **Experimentalmente:** SFC aumenta en vehículos

Experimentalmente



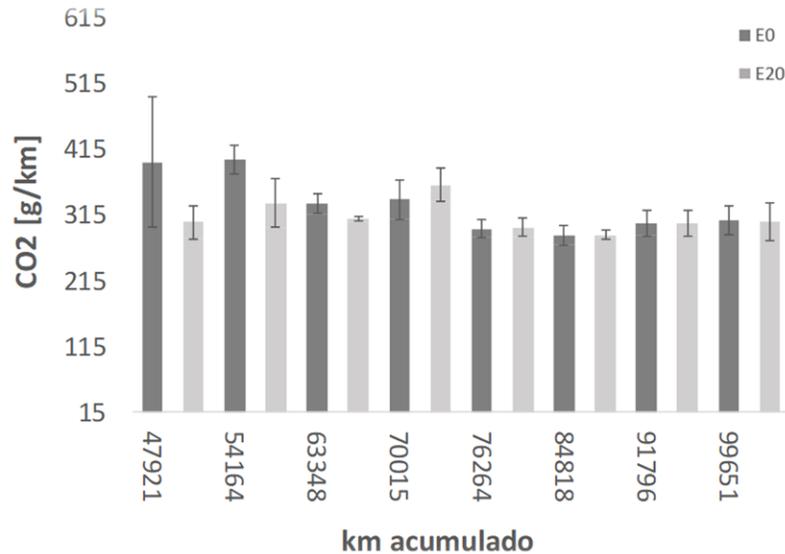
# Emisiones de CO<sub>2</sub>

Análiticamente



CO<sub>2</sub> aumentan entre 0.22% y 1.65% con el uso de E20

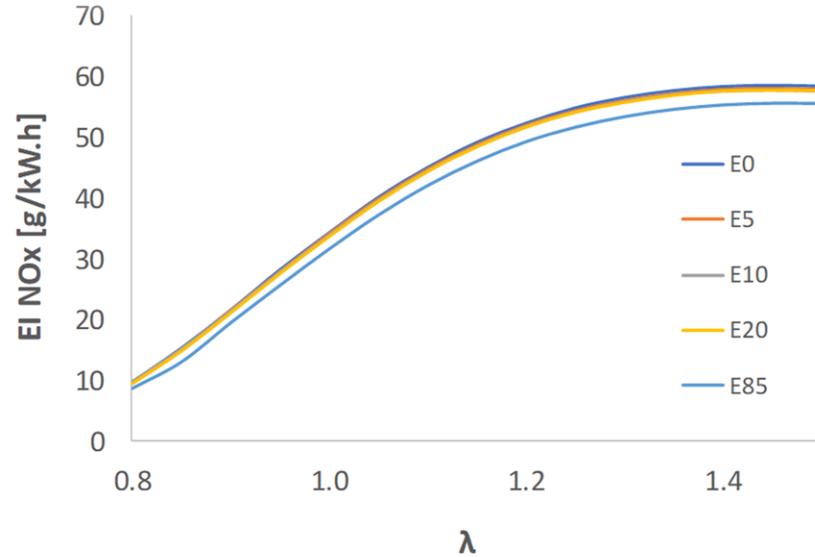
Experimentalmente



Las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen de 2.97% a 3.62%

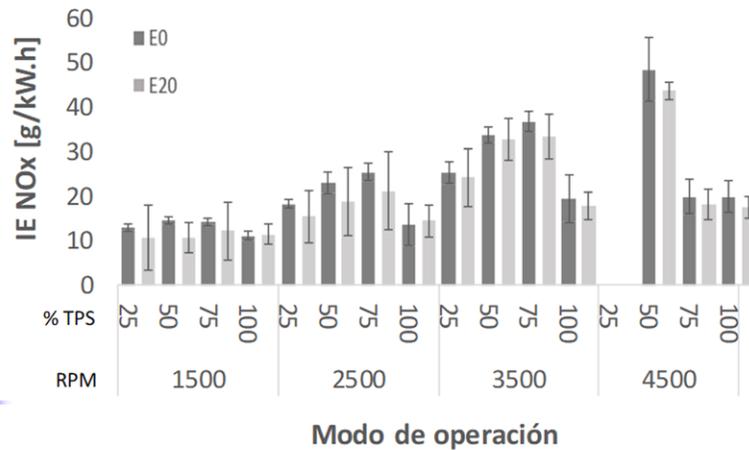
# Emisiones de NOx

Analíticamente



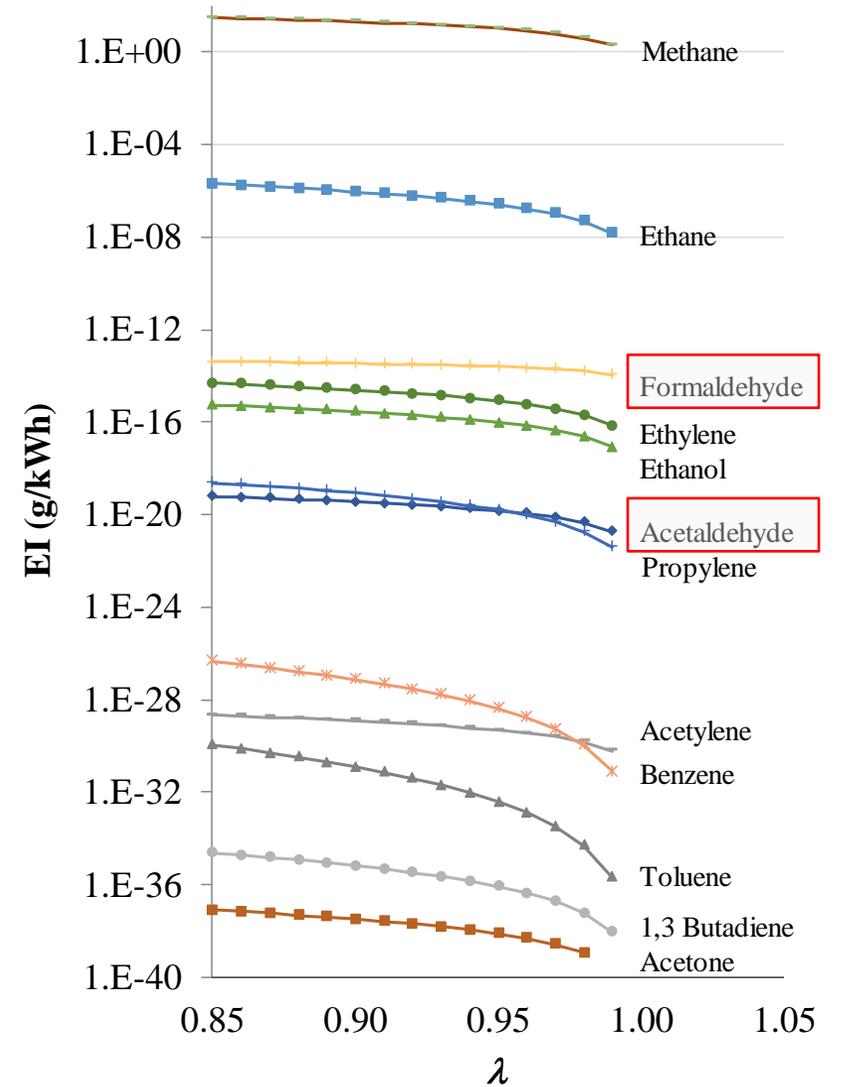
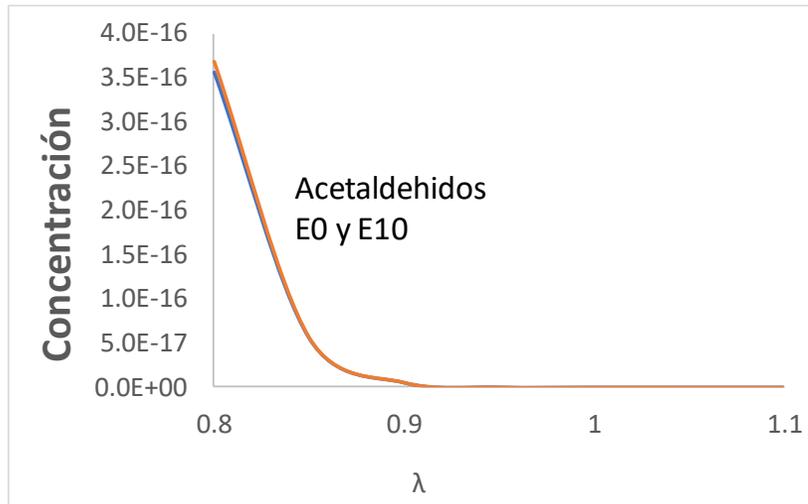
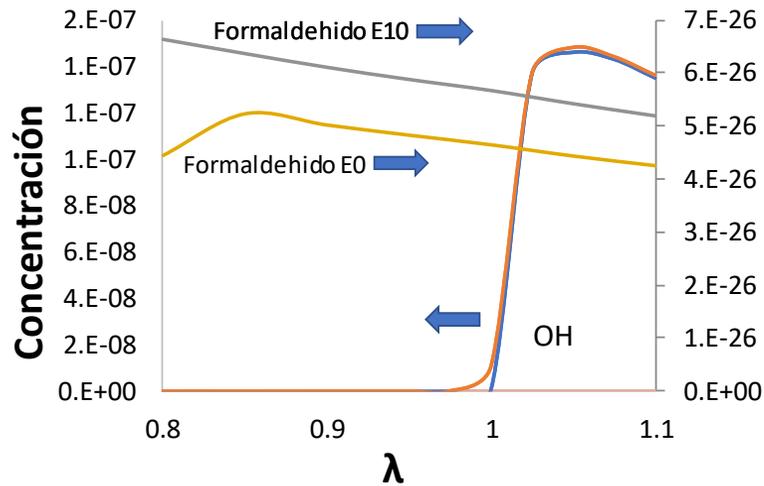
- **Analíticamente:** NOx disminuyen entre 1.22% y 2.50%

Experimentalmente



- **Experimentalmente:** NOx disminuye ~3%

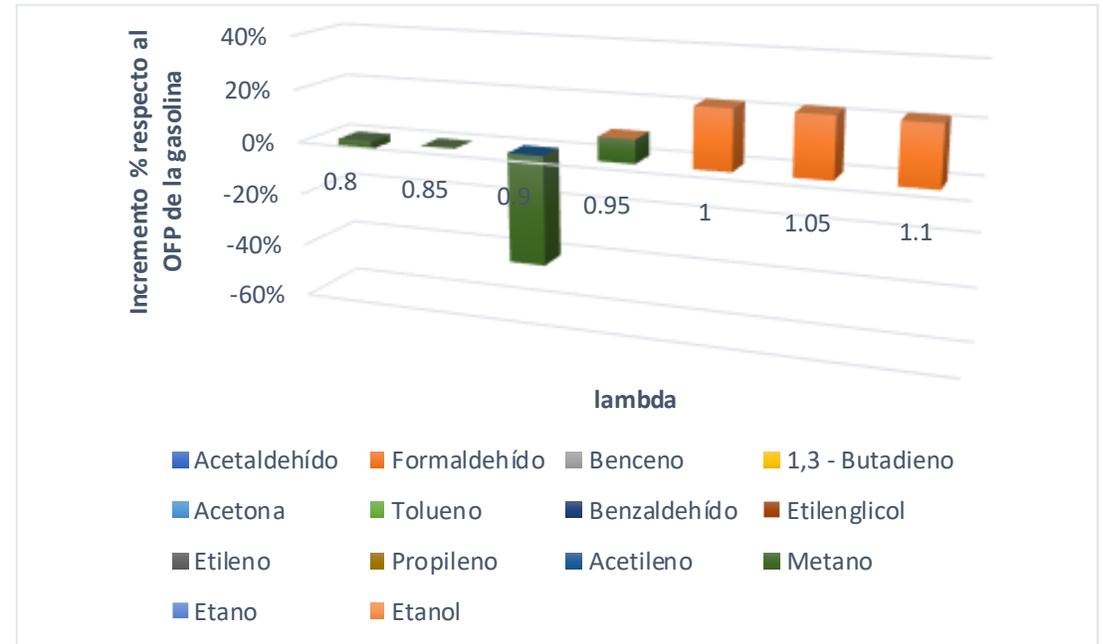
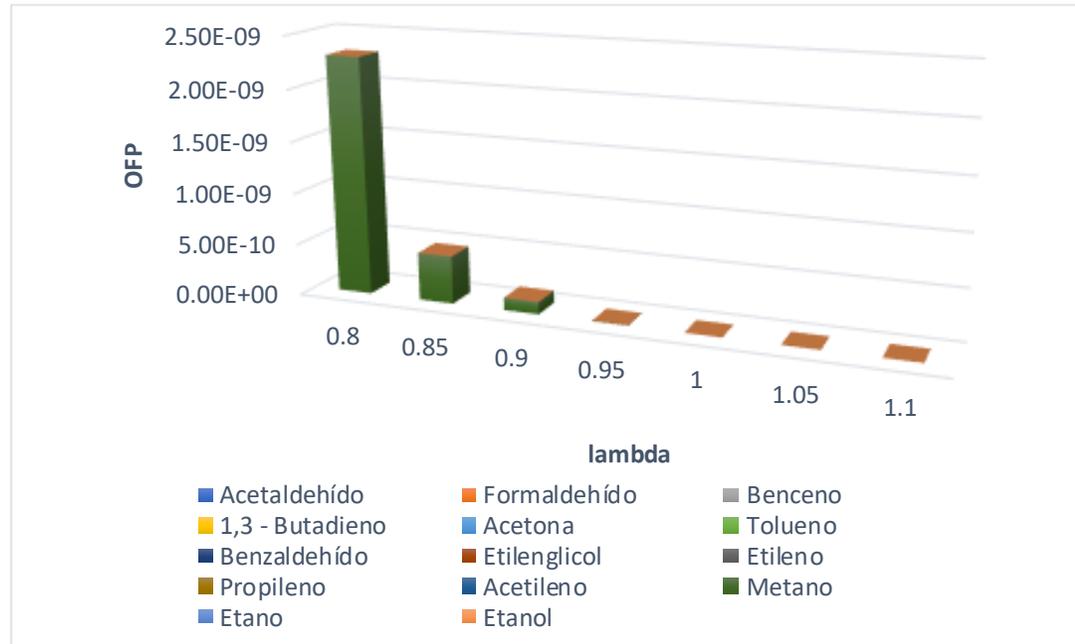
# Emisiones de VOCs



MIR: Ethane =0.28, Formaldehyde=4.5, Acetaldehyde =4.45

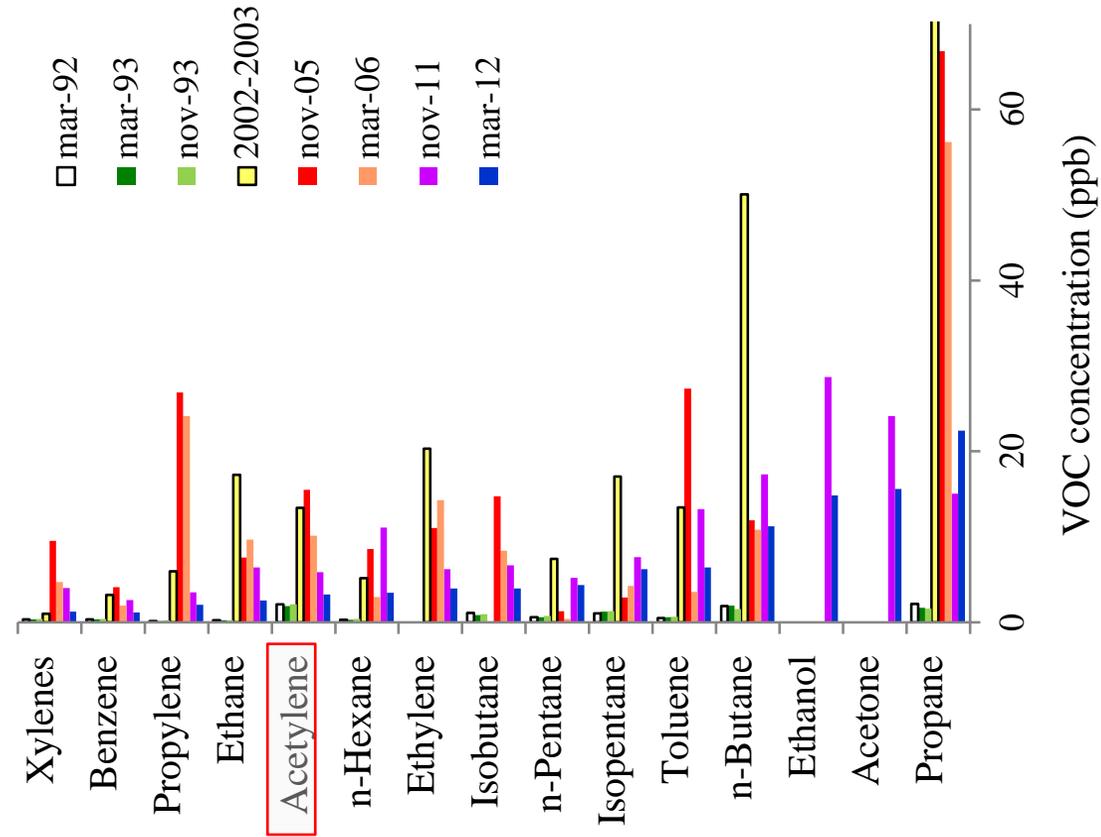
# Potencial de formación de ozono a la salida del tubo de escape usando termo- equilibrio

$$OFP = \frac{1}{M_{O_3}} \sum MIR_i Y_i M_i$$



- Los mas relevantes son en su orden: **metano, etano, formaldehido, acetaldehído y acetileno**
- En mezclas pobres ( $\lambda > 1$ ) el potencial de formación de ozono es despreciable
- En mezclas pobres ( $\lambda > 1$ ) **formaldehido** es el único VOC que permanece e incrementa el potencial de formación de ozono relativo a un potencial de formación de ozono despreciable
- En proceso de combustión con **mezclas ricas la presencia de etanol reduce el potencial de formación de ozono** ( $\lambda < 1$ ).

# VOCs in Mexico City



# GHG emissions

- CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were considered as GHG
- CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O have a global warming potential equivalent to 28 and 265 times that of CO<sub>2</sub> (1)
- Results reported in terms of CO<sub>2</sub> equivalent per km (kg CO<sub>2</sub>e/km)
- A life cycle analysis was considered
  - During fuel production (power source to fuel tank, WtT)
  - During vehicle operation (from tank to wheel, TtW).
- The use of CNG could represent a reduction of 24% on CO<sub>2</sub> emissions
- Ethanol emissions  $-0.012 \pm 0.003 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ MJ}^{-1}$

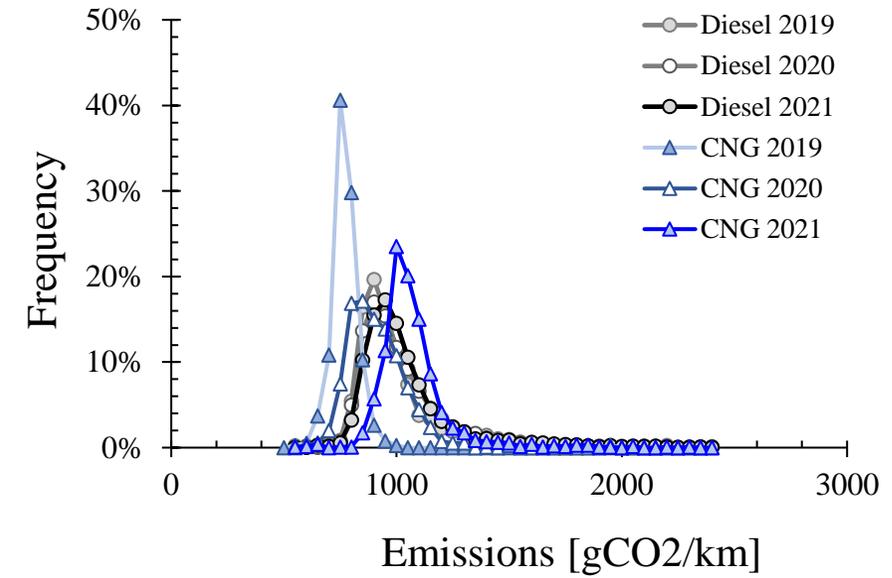
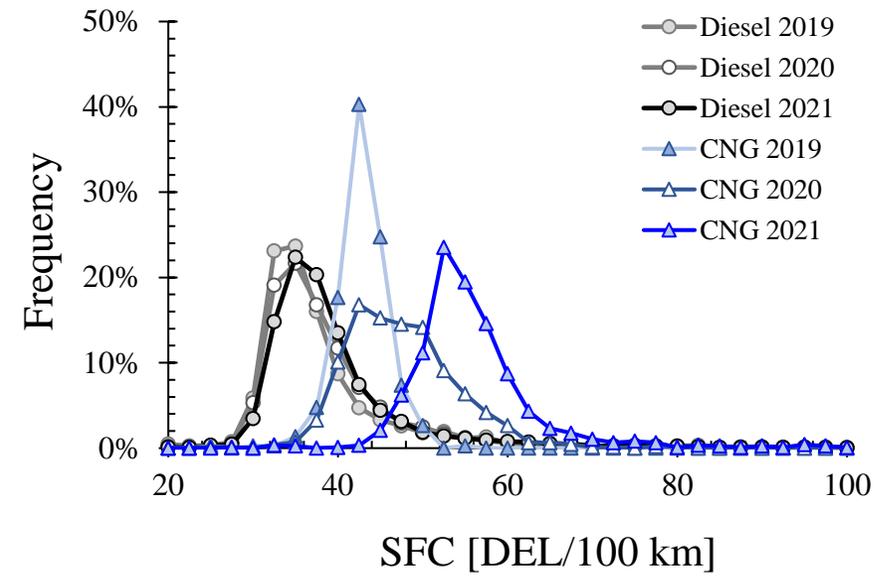
*Emission factors for diesel, CNG and electric vehicles operation*

*Values from SEMARNAT*

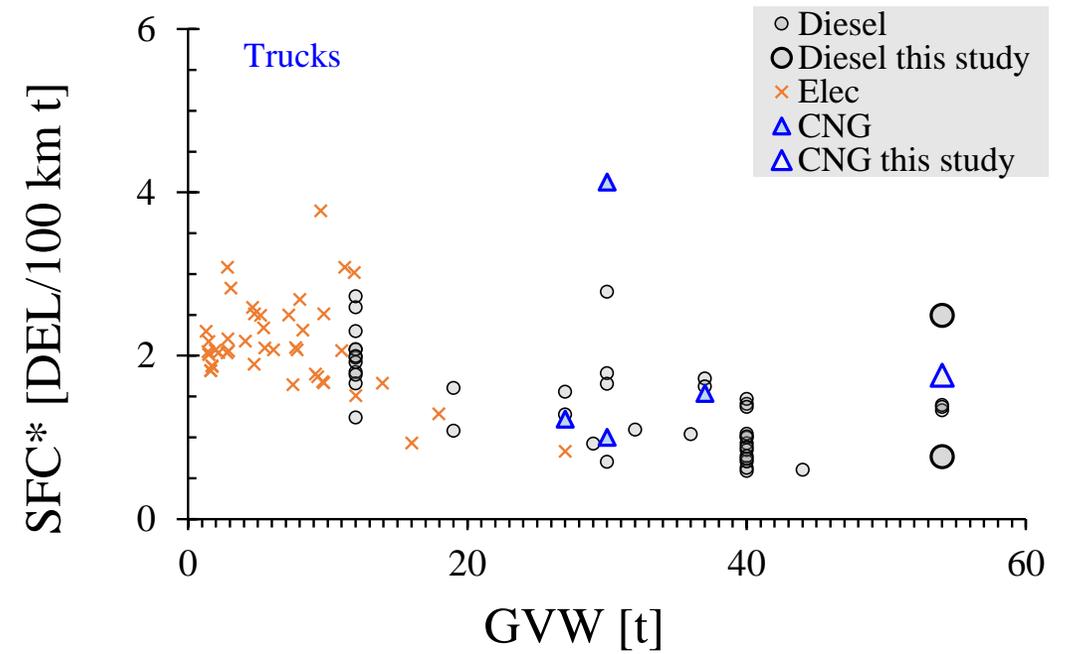
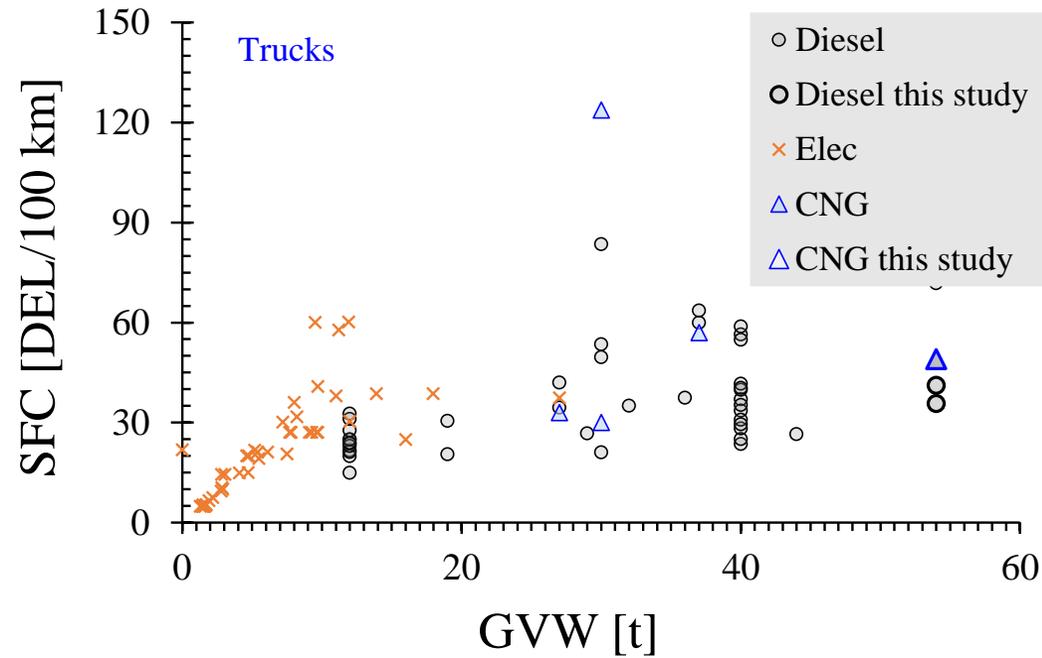
- For the case of production, distribution and transportation of diesel and CNG emission factor, the values reported by United Kingdom were used (DBEIS & DEFRA, 2022)
- (1) (IPCC, 2014; SEMARNAT & INECC, 2019)

Energy source	WtT	CO <sub>2</sub>	TtW		WtW
	kg CO <sub>2</sub> e/DEL		kg/DEL	CH <sub>4</sub>	
		kg/DEL	kg/DEL	kg/DEL	Kg CO <sub>2</sub> e/DEL
Diesel	0.61*	2.68	0.0001	0.0001	3.33
VCNG	0.44*	2.03	0.0033	0.0001	2.58
Electric	1.96	0.00	0.0000	0.0000	1.96

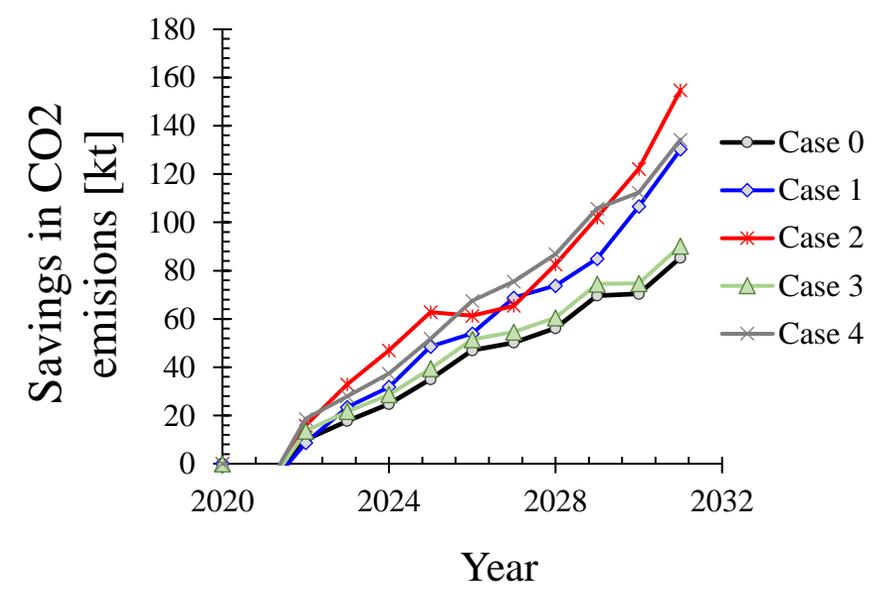
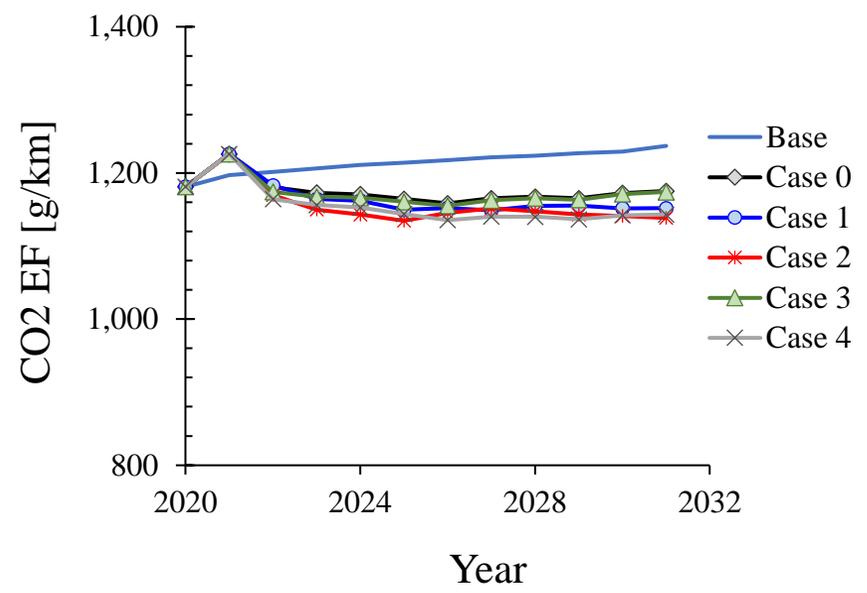
# Real GHG emissions



# Freight transport: Electric vs. CNG vs. Diesel



# Savings in CO2 emissions



- Results in CO2 instead of CO2e
- Km or (Km t) is not the same in each case

## Conclusiones etanol

### Energía

- Ligero aumento en SFC
- Ligera reducción en torque y potencia

### Emisión

- Reducción de CO, NO<sub>x</sub>, lo cual reduce la formación de partículas
- Aumento ligeramente CO<sub>2</sub>
- Despreciable aumento en VOC, particularmente acetaldehído y formaldehído

### Atmósfera

- Es posible que el incremento de VOC en la atmósfera de ZMM contribuya en al incremento de O<sub>3</sub>, sin embargo, se requiere de un estudio específico para evaluar el efecto de E10 en la formación de O<sub>3</sub>

## Conclusiones otras alternativas

Se pueden lograr grandes ahorros de CO<sub>2</sub> operando con vehículos eléctricos.

- Comience la adopción de vehículos eléctricos con precaución
- Limitar el uso de vehículos eléctricos para el caso en que las autonomías bajas sean apropiadas y donde el aire acondicionado no sea obligatorio.
- Combinar con estrategias para generar o utilizar electricidad a partir de fuentes verdes



Gracias

*Dr. José Ignacio Huertas*  
*[jhuertas@itesm.mx](mailto:jhuertas@itesm.mx)*

