



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**“DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE CALOR ANTROPOGENICO DE LA CIUDAD DE
MEXICO MEDIANTE INVENTARIOS”**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:
MARTÍN BONIFACIO BAUTISTA**

**TUTOR:
DR. VÍCTOR LUIS BARRADAS MIRANDA (Instituto de Ecología)**

**JURADO EXAMINADOR:
DRA. MARÍA ENGRACIA HERNÁNDEZ CERDA (Instituto de Geografía)
DR. ARÓN JAZCILEVICH DIAMANT (Centro de Ciencias de la Atmósfera)
DR. VÍCTOR LUIS BARRADAS MIRANDA (Instituto de Ecología)
DR. RICARDO TORRES JARDÓN (Centro de Ciencias de la Atmósfera)
DR. FRISO HOLWERDA (Centro de Ciencias de la Atmósfera)**

Ciudad Universitaria, agosto 2016



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.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Al posgrado de Ciencias de la Tierra y al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por haber aceptado mi solicitud de ingreso a la maestría y permitirme realizar la presente investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado una beca durante los estudios de maestría (CVU: 550297). Así mismo agradezco al proyecto DGAPA-PAPIIT "Lineamientos climáticos y bioclimáticos para la planeación urbana en México" con clave IT201514 por las facilidades y el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo.

Al Instituto de Ecología de la UNAM, por permitirme realizar mi trabajo de tesis dentro de sus instalaciones.

A mi tutor, el Dr. Víctor Luis Barradas Miranda, por haber aceptado ser mi asesor durante la elaboración de esta tesis.

A los miembros del sínodo evaluador: Dra. María Engracia Hernández Cerda, Dr. Arón Jazcilevich Damiant, Dr. Ricardo Torres Jardón y Dr. Friso Holwerda. Gracias a cada uno de ustedes por sus muy apreciados comentarios, sugerencias y demás aportaciones.

También agradezco a la Dra. Sue Grimmond y al Dr. Fredrik Lindberg, por el asesoramiento brindado en la instalación del modelo LUCY.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis padres y hermanas por todo el apoyo brindado durante mi desarrollo profesional, quienes han sido la guía y el camino para poder llegar a este punto de mi carrera.

A la familia Moguel Flores por el apoyo, consejos y confianza depositada en mí, pero sobre todo por permitirme ser parte de su familia.

Nuevamente agradezco al Dr. Víctor Luis Barradas Miranda, pero en éste apartado por haber confiado en mí, además de brindarme su amistad y confianza.

Al Dr. Manuel Esperón Rodríguez que a pesar de la distancia siempre me brindó su apoyo y consejos para llevar a cabo el presente trabajo.

A mis compañeros del laboratorio de Ecofisiología y del Centro de Ciencias de la Atmósfera por ser muy buenos amigos y por haberme apoyado y escuchado en incontables ocasiones.

A mis compañeros de licenciatura que después de varios años es grato volver a reunirnos, por todas esas noches de alegría, son una hermosa familia.

Y en especial a ti Ana, por ser parte de mi vida pero sobre todo por darme una mayor felicidad. La ayuda que me has brindado ha sido sumamente importante, estuviste a mi lado inclusive en los momentos y situaciones más tormentosas, siempre ayudándome. Gracias, amor.

Y a ti *“el mejor momento de nuestras vidas”*

"Arboles y amores, mientras tengan raíces tendrán frutos y flores."

Anónimo

ÍNDICE GENERAL

Resumen	vi
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	3
2. Hipotesis.....	7
2.1 Obejetivo general	8
2.1.1 Objetivos Particulares.....	8
3. Marco teórico.....	8
3.1 Balance de energía urbano.....	8
3.2 Componentes del calor antrópico	9
3.3 Efectos del calor antrópico.....	9
3.3.1 Impactos ambientales	9
3.3.2 Impactos en la salud	10
3.3.2 Calor antrópico e isla de calor urbana	12
4. Área de estudio	16
4.1 Ubicación	16
4.1.1 Climatología de la Ciudad de México	17
5. Metodología	18
5.1 Modelo del calor antrópico vehicular	18
5.1.1 Eficiencia térmica	19
5.1.2 Calor de combustión neto	20
5.1.3 Tipo de combustible	21
5.1.4 Densidad de combustible	23
5.1.5 Economía del combustible	23
5.2 Mediciones y clasificación vehicular	28
5.3 Generación de calor antrópico semanal.....	32
5.4 Radiación neta	32
5.5 Hora de puesta y salida del sol	33
5.6 Modelo LUCY	34

6. Resultados y Discusión	35
6.1 Calor antrópico vehicular de un día típico	35
6.2. Calor antropogénico vehicular durante una semana	38
6.3. Radiación solar neta y flujo de calor antrópico vehicular	45
6.4 Determinación de Q_F modelo LUCY	48
7. Conclusiones	52
8 Bibliografía	55
9. Anexos	64

Resumen

El crecimiento desmedido y aparentemente caótico de la Ciudad de México, ha traído como consecuencia la necesidad de satisfacer una demanda adicional de bienes y servicios. Esto se traduce en un mayor consumo energético y en consecuencia una mayor emisión de calor.

Investigadores de diferentes instituciones nacionales e internacionales han trabajado sobre el fenómeno de la isla de calor urbana (ICU) y la energía generada por sus habitantes (calor antropogénico, Q_F), aspectos clave del clima urbano (e.g. Barradas, 1987; Oke, 1988; Grimmond y Oke, 1991; Jáuregui, 1997; Ichinose *et al*, 1999; Fan y Sailor, 2005).

El objetivo de este trabajo es el de estimar el flujo de calor antropogénico vehicular, por lo que se recurrió al análisis del modelo propuesto por Oke (1987) y Grimmond (1992), el cual es basado en el balance de energía urbana. La emisión de calor a partir de la combustión de vehículos automotores (Q_V), tomando en cuenta el número y clase de vehículos, tipo de combustible y la distancia que viaja el vehículo.

La clasificación de vehículos se realizó mediante el análisis de videos que fueron tomados en un segmento de la avenida Pedro Henríquez Ureña (Eje 10 Sur, entre las calles Cerro del Agua y Delfín Madrigal, dirección oriente y poniente), además de contar con sensores a nivel de calzada que contabilizaban el flujo vehicular cada 15 minutos durante las 24 horas en septiembre del 2010. Esta clasificación se realizó para horas representativas del ciclo diurno, con las clases obtenidas y sus productos porcentuales se reconstruyó el ciclo diurno del tráfico para una semana típica del año.

Durante la semana laboral, se presentan dos picos importantes de flujo vehicular (7:00-8:00 y 18:00-21:00), siendo el mayor a las 7:00 a las 8:00 horas, con un número de 5,762 vehículos/h de donde 4,392 son automóviles privados, 1205 son taxis, 149 son microbuses y autobuses, y 16 motocicletas. Para el fin de semana se observó un pico importante (12:00- 14:00), en un promedio de sábado y

domingo en la hora de mayor flujo se tuvo 4,408 vehículos/h de donde 3,350 son automóviles privados, 927 son taxis, 117 son microbuses y autobuses, y 14 motocicletas.

El análisis mostró que la mayor emisión de calor se da durante la mañana y tarde y que, al compararlo con la radiación neta en horas específicas del día, éste puede ser significativo, pues alcanza un valor alrededor de los 20 W m^{-2} . Esta emisión probablemente es semejante en avenidas con características similares a la analizada. También se debe considerar que éste es solo un componente del modelo de flujo de calor por actividades antrópicas, y probablemente este no variará significativamente ya que su emisión depende de las actividades diarias, actividades que son semejantes a lo largo del año.

También se utilizó el modelo LUCY (Allen *et al*, 2011) el cual mostró que la generación total de calor antrópico (Q_F) en áreas densas de la Ciudad de México, puede llegar a superar los 100 W m^{-2} para ciertas horas del día, en nuestra zona de estudio con el modelo se obtuvo un promedio de 14 W m^{-2} mientras que el Q_V obtenido por la clasificación obtuvo un promedio de 17 W m^{-2} .

Con los resultados obtenidos, es posible idealizar un auto estándar que permita estimar de manera más precisa el flujo de calor antrópico vehicular, en las diferentes vías de tránsito de la Ciudad de México, permitiendo obtener éste componente de forma más sencilla y rápida. De acuerdo a los resultados del modelo, mostraron que es necesario integrar el componente de flujo de calor antrópico en el balance de energía, para futuros estudios del clima urbano.

1. Introducción

Las ciudades experimentan día con día modificaciones en sus diversas áreas, lo cual se ve reflejado en un crecimiento urbano, siendo éste un fenómeno cuyo origen se centra en la estructura misma de la sociedad y en su evolución histórica. Esta dinámica de crecimiento depende de la convergencia de diversos factores económicos, demográficos, culturales, políticos, sociales, geográficos y tecnológicos, así como de la forma en que éstos interactúan entre sí y del momento histórico en que lo hacen (Escobedo, 1992). Estos niveles crecientes de urbanización son la consecuencia principalmente de la migración rural a las ciudades (GEO, 2016).

En el periodo que abarca de 1900 a 1930, la Ciudad de México creció de 344,000 habitantes a 1, 029,000. En esta etapa, el área comercial aumentó su población residente, así como también la fuerza de trabajo que iba a “México”, es decir, se dirigía al “centro”. En 1930, la ciudad se expande hacia las delegaciones de Coyoacán y Azcapotzalco. Asimismo, la expansión se presenta en algunas zonas de las delegaciones que rodean a la ciudad central (Garza y Damián 1991).

De 1930 a 1950 el crecimiento más acelerado se presentó en las delegaciones, próximas a la ciudad central “expansión periférica”; de 1950 a 1980, en la denominada “dinámica metropolitana” el crecimiento urbano rebasó los límites del Distrito Federal por el norte y se expandió hacia los municipios del Estado de México, tales como Tlalnepantla en 1950 y para 1960 se incorporaron Naucalpan, Chimalhuacán y Ecatepec. En 1970, el área urbana de la Ciudad de México (AUCM) se extendía sobre una superficie de 650 km² aproximadamente, para 1980 el AUCM era de 1,115 km² (Garza y Damián 1991).

El crecimiento acelerado, en espacio y en población, de una ciudad como la de México, trae como consecuencia la necesidad de satisfacer una demanda adicional de bienes y servicios, por lo que se debe reforzar la dotación de infraestructura y equipamiento en rubros como agua, drenaje, energía, transporte, educación, salud, vivienda, etcétera.

Esta expansión y aumento de la actividad urbana tienen varios impactos en los entornos urbanos. Estos impactos están representados por la contaminación del aire, contaminación del agua, la polución térmica, causada por la emisión de calor antropogénico, y así sucesivamente.

El desarrollo urbano conduce a fenómenos tales, como la isla de calor urbana (ICU), fenómeno por el cual las regiones urbanas experimentan temperaturas más cálidas que las áreas rurales circundantes (Oke, 1982; Barradas, 2013). El calor antropogénico no solo afecta al clima local de las zonas urbanas, si no también favorecen fenómenos tales como el mencionado (Kimura y Takahashi, 1991).

Cervantes *et al.*, (2011), describen a la ICU en los siguientes términos:

“La isla de calor tiene su origen en la brutal transformación del espacio rural en urbano, caracterizada principalmente por las diferentes propiedades físicas y térmicas del sistema urbano en los que se incluyen a la capacidad térmica, las razones de calentamiento y enfriamiento, la generación de calor antrópico y la rugosidad superficial. Estas propiedades son capaces de modificar y modular las variables microclimáticas de tal forma que generan una entidad discreta al mostrar fronteras bien definidas que las separan de sus alrededores...”

Con la concentración de las actividades antropogénicas en las zonas urbanas y el fenómeno de la ICU, resulta ser un factor insostenible que lleva a un uso excesivo de energía para la refrigeración y coloca a la población urbana en mayor riesgo de aumento de la morbilidad y la mortalidad (Shahmohamadi *et al.*, 2011).

Uno de los mecanismos del sistema ciudad-atmósfera más afectados por la urbanización es el balance de energía, en el que la energía disponible o radiación neta en un sitio dado por el balance de radiación superficie-atmósfera (solar y terrestre), es disipada principalmente por el calor usado en el caldeoamiento del aire (flujo de calor sensible) y/o en la evaporación del agua (flujo de calor latente). Aunque la urbanización afecta a todos los elementos del balance energético, el flujo de calor latente es el que presenta el cambio más abrupto (Cervantes *et al.*, 2011) junto con el almacenaje del sistema.

1.1 Antecedentes

Muchas ciudades se enfrentan a serios problemas de transporte urbano debido al número creciente de vehículos en circulación. Tan sólo en la Zona Metropolitana del Valle de México, integrada por el Distrito Federal y 28 municipios del Estado de México, la flota vehicular registrada en el año 2000 era de 3,511,371 vehículos (Lozano *et al.*, 2003).

Como las ciudades han llegado a ser los principales centros de las actividades económicas, la población tiende a desplazarse a éstas. Tal concentración de personas requiere transporte no sólo para ellas mismas, sino también para los productos que consumen o producen.

De acuerdo a datos del INEGI (2016), para la Ciudad de México, en comparación con el año 2000 el número de vehículos se ha duplicado en los últimos años (2012-2014), pasando de 2.5×10^6 a casi 5×10^6 de vehículos en esta gran área urbana (Fig. 1).

Según los mismos datos de INEGI la planta de vehículos públicos y taxis es la que ha tenido un mayor crecimiento, ya que desde 1980 hasta el 2014 éstos han ocupado por encima del 90% del total vehicular, alcanzado cantidades superiores a 4×10^6 unidades a partir del 2010 (Fig. 2), y para el 2014 éstos ocupan el 93.3% del total de la flota vehicular.

De acuerdo al análisis de los datos de INEGI (2016), excluyendo a los automóviles particulares y taxis. El transporte público ha tenido crecimiento constante desde el 2002 hasta el 2014, y el transporte de carga tiende a la baja, fenómeno ligado a las nuevas leyes de tránsito para el área urbana (El Financiero, 2014; Excélsior, 2014). El transporte público (microbuses y autobuses) es importante monitorear su incremento, debido a la cantidad de consumo de combustible por distancia.

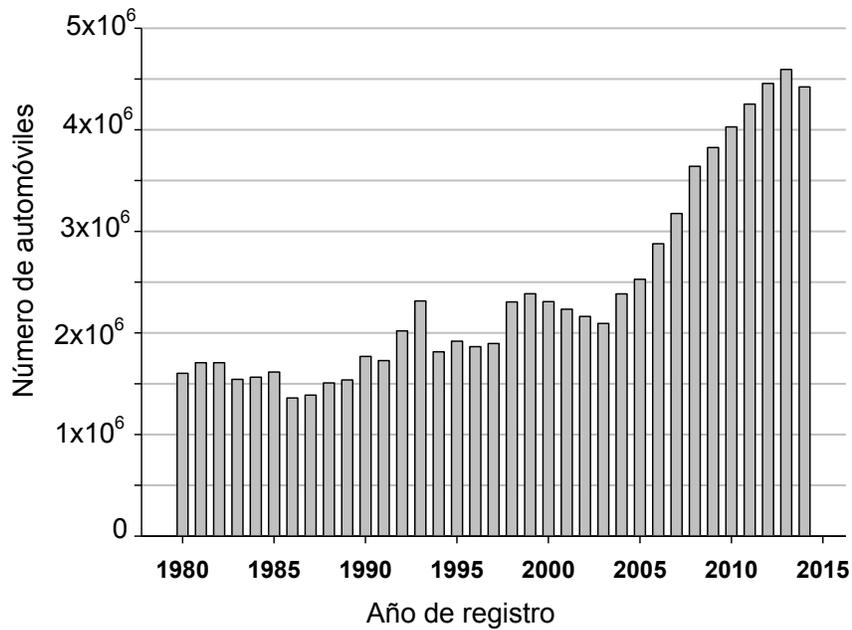


Figura 1. Crecimiento vehicular acumulado de automóviles de 1980 a 2014 en la Ciudad de México (elaboración propia según datos de INEGI, 2016).

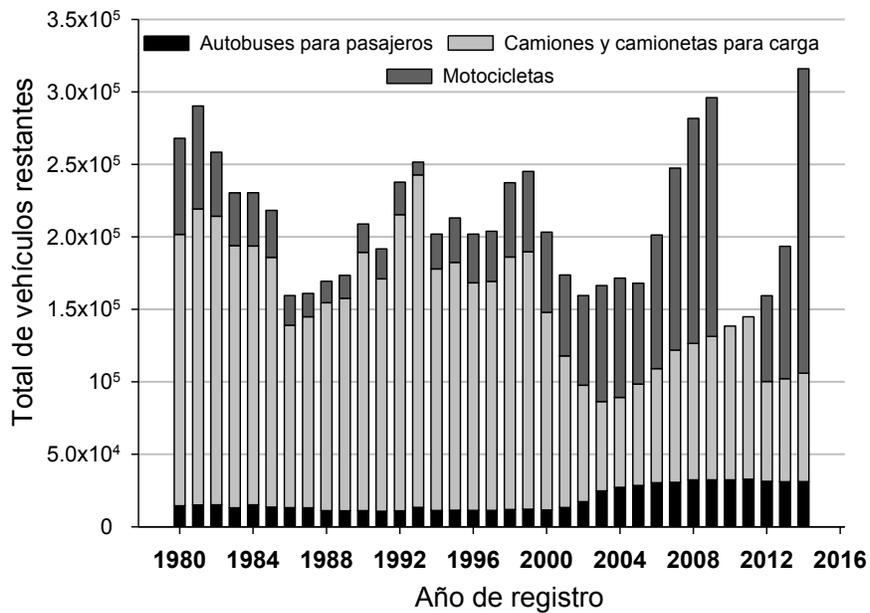


Figura 2. Crecimiento vehicular de la Ciudad de México excluyendo el crecimiento automovilístico.

La contaminación ambiental en áreas urbanas es uno de los problemas más importantes que enfrenta la población mundial, y en ese asunto el tránsito vehicular juega un papel primordial, ya que es una de las principales fuentes de emisiones contaminantes.

De acuerdo al Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (SEDEMA, 2012), un importante porcentaje del total de las emisiones es generado por fuentes móviles, es decir vehículos automotores (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de emisiones por fuentes móviles (SEDEMA, 2012).

Emisiones	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	NH ₃
Fuentes móviles	11.04	8.7	98.2	87.7	11.11

Durante 2014, la concentración del contaminante de Ozono superó en 123 días el valor recomendado por la NOM-020-SSA1-1993 para el promedio horario, acumulando un total de 358 horas durante el año (SIMAT, 2014). Esta situación no mejorará a menos que las emisiones vehiculares e industriales se reduzcan drásticamente, pero existen otras acciones ambientales que pueden ayudar a aliviar la situación (Jazcilevich, 2002).

Sin embargo, los vehículos no solo emiten gases contaminantes, si no también liberan calor residual que forma parte de la polución térmica (Barradas, 2013), esta liberación es debida a la combustión de los combustibles fósiles, y que es un elemento del modelo de lo que es el calor antropogénico (Q_F), el cual está compuesto principalmente por tres fuentes de emisión de calor: vehicular, eléctrico y metabólico.

La modificación drástica del entorno y la demanda de transporte transfiere cambios en las propiedades físicas y químicas de la atmósfera. Las principales ciudades que experimentan dichos cambios son aquellas que han tenido un crecimiento urbano acelerado.

Puede afirmarse que las condiciones de ICU están relacionadas con la masa térmica urbana y el calor antropogénico (Papparelli, *et al.*, 2011), de manera que varias investigaciones constituyen el comienzo del estudio de las variables

intervinientes en la producción de Q_F , como importantes factores incidentes en el aumento de la temperatura y disminución de la humedad relativa de la ciudad en relación a las zonas no urbanas o periféricas.

Investigadores de diferentes instituciones nacionales e internacionales han trabajado sobre el fenómeno de la isla de calor y el Q_F , aspectos de suma importancia para el clima urbano. Barradas (1987) por ejemplo, ha trabajado en la creación de sistemas de vegetación urbana, y así evitar los problemas actuales de la llamada polución térmica, diferente a la contaminación, que es mucho mayor. El investigador desarrolló un modelo teórico computacional el cual indica que colocar plantas de forma estratégica en la urbe reduciría hasta cuatro grados centígrados el entorno durante la época de calor. Asimismo, se podrían ahorrar cada año 30 mil millones de pesos en consumo de energía, resultado del empleo de aire acondicionado para enfriar los edificios (Barradas 1987, Barradas y J-Seres 1988).

Estudios de modelación del clima urbano sugieren que el calor residual de las actividades urbanas también puede desempeñar un papel clave en la formación de la isla de calor urbana (Kimura y Takahashi, 1991; Ryoo y Moon, 1995; Ichinose *et al.*, 1999; Khan y Simpson, 2001).

El estudio de Ichinose (1999) por ejemplo, estima que el calor antropogénico en invierno de un área aislada (25 m de resolución) en el núcleo urbano de Tokyo, alcanza 400 W m^{-2} durante el día y en horas de la madrugada llega a alcanzar 1590 W m^{-2} . Por otro lado en los hogares de los suburbios el Q_F ha llegado a alcanzar 30 W m^{-2} por las noches.

Aunque el flujo de calor antropogénico es superior a 100 W m^{-2} en los centros urbanos (Oke, 1988; Ichinose *et al.*, 1999), se trata de modelos urbanos y de meso-escala (e.g. Kimura y Takahashi, 1991; Grimmond y Oke, 1991; Fan y Sailor, 2005; Dandou *et al.*, 2005; Makar *et al.*, 2006), y se descuida en los modelos climáticos globales actuales (MCG).

La exclusión de presente y futuro del Q_F puede conducir a importantes deficiencias de modelado, especialmente en los que los MCG siguen para resolver los detalles

más finos, las cuales se aplican a las proyecciones climáticas regionales, y se utilizan para el estudio de la interacción química-clima, el Q_F puede alterar significativamente la evolución de los contaminantes de aerosol y de gas, ya que se generan normalmente al mismo tiempo (Crutzen, 2004).

En el informe del 2007 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), *La liberación de calor antropogénico* es el título de una sección (2.5.7 del Grupo de Trabajo I), donde se afirma que "la producción de energía humana es una pequeña influencia en la escala global" en la temperatura. Por tanto, se ha descuidado en todos los cálculos, incluso en aquellos que alcanza hasta el año 3000 (en la sección 10.7.2 del Grupo de Trabajo I).

Como se ha descrito la mayoría de los estudios disponibles se han llevado a cabo principalmente en las regiones de latitudes medias con excepción de Hong Kong, Ciudad de México y Sao Paulo.

Anne y Roth (2012), describen que la magnitud de Q_F que varía en gran medida no solo entre ciudades, si no también dentro de las ciudades, dependiendo del uso per-cápita de energía, la densidad de la población, las condiciones meteorológicas y climáticas. La misma autora realizó una recopilación bibliográfica donde muestra el valor de emisión del Q_F para diferentes ciudades del mundo y su uso de suelo para algunas, de esta recopilación destacan: Manhattan (New York), USA., Montreal, Canadá., New York City, USA y Moscú, Rusia, con una media anual de 159, 99, 47 y 127 $W m^{-2}$, respectivamente.

2. Hipótesis

El crecimiento de la Ciudad de México ha provocado un incremento del parque vehicular, provocando un mayor consumo energético cuya consecuencia es una mayor emisión de calor antrópico vehicular que afecta el balance energético urbano.

2.1 Objetivo General

Analizar el flujo calor antropogénico generado por vehículos en un área típica de la Ciudad México, a través de la clasificación vehicular, y de sus características fisicoquímicas.

2.1.1 Objetivos particulares

Determinar el calor antropogénico generado por el tránsito vehicular.

Determinar los principales picos de emisión de calor y la clase de vehículo que lo genera.

Determinar si el máximo del calor vehicular generado, es significativo.

Comparar el Q_V obtenido con el estimado por un modelo global de escala urbana del flujo de calor antrópico.

3. Marco Teórico

3.1 Balance de energía urbano

El Q_F interactúa con su entorno de una manera compleja. Para entender y simplificar la complejidad, Oke (1987) ha sugerido una ecuación conocida como el "balance de energía urbana" que no es más que la aplicación de la primera ley de la termodinámica, la cual incluye el Q_F , con el fin de abordar con eficacia los problemas ambientales que las zonas urbanas enfrentan, como consecuencia de sus patrones de consumo de energía, ya que es esencial tener primero una mejor comprensión de la naturaleza de su climatología física:

$$Q_N + Q_F = Q_H + Q_E + Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

Donde Q_N es el flujo de radiación neta, Q_F el flujo de calor antropogénico, Q_H y Q_E son el flujo de calor sensible y calor latente, respectivamente; Q_S es el almacenamiento de calor neto y ΔQ_A la advección de calor neto.

Q_F , representa el calor generado a partir de fuentes fijas y móviles de un área. Este componente se ha modelado como la suma del calor generado por los edificios, vehículos y personas (Grimmond, 1992; Sailor y Lu, 2004) o como calor residual en otros términos (Christen y Vogt, 2004).

El calentamiento antrópico puede ser un componente importante del balance de energía urbana. Por ejemplo Fan y Sailor (2005), encontraron que la inclusión del calentamiento antrópico en el modelado de mesoescala de Filadelfia contribuye 2-3 °C a la ICU durante la noche en invierno. Salamanca *et al.*, (2014), han demostrado de manera similar, a través de la utilidad de los modelos de mesoescala y de predicción (WRF) dinámicamente acoplado a una parametrización de energía del edificio, que el uso de sistemas de aire acondicionado, aumentó la temperatura del aire en verano durante la noche por más de 1 °C para el área metropolitana de Phoenix.

3.2 Componentes del calor antrópico

Como se ha mencionado el flujo de calor antropogénico (Q_F), es la energía liberada debido a las actividades humanas, y a menudo es considerada como insignificante eliminándola en los estudios de balance de energía urbana. La mayoría de los modelos se basan en un sencillo reparto de las fuentes de flujo de calor antrópico (Q_F) (Grimmond, 1992; Sailor y Lu, 2004):

$$Q_F = Q_V + Q_E + Q_M \quad (2)$$

Estas representan las principales fuentes de calor residual en el medio urbano, donde Q_V el calor emitido por vehículos, Q_E es el calor liberado principalmente por edificaciones y Q_M el calor generado por el metabolismo de las personas (Ec. 2).

3.3 Efectos del calor antrópico vehicular

3.3.1 Impactos ambientales

El 18% de las emisiones de CO₂ del país son generadas por los automóviles particulares, lo que le podría costar hasta el 6% del PIB si no se toman las medidas de prevención adecuadas (Galindo, 2009), mientras que el 95% del consumo de gasolina en México es destinado al autotransporte (Galindo, *et al.* 2008). A nivel urbano los vehículos son una de las fuentes principales de contaminantes criterio.

La expansión de las áreas urbanas y el incremento de las actividades antrópicas (como la demanda de transporte), tienen varios impactos en los entornos urbanos. Estos impactos están representados por la contaminación del aire, agua, la contaminación térmica, causada por la emisión de calor antrópico, y así sucesivamente (Ichinose, 1999).

En un estudio realizado por Kimura y Takashi (1991) en Tokyo (zona densamente urbanizada), muestra que Q_F afecta el clima local, contribuyendo significativamente en la ICU, Este proceso ha sido explorado en una simulación numérica.

La evaluación de la actividad antrópica en el impacto ambiental por el cambio de uso del suelo y el Q_F en el ambiente térmico urbano, es necesario para la planificación urbana. El análisis cuantitativo de cómo las estructuras y las actividades antrópicas deben ser modificadas para mitigar fenómenos tales como la de la ICU, por lo que se requieren datos detallados sobre las fuentes de Q_F (Ichinose, 1999).

La magnitud de Q_F se correlaciona bien con la densidad de población. A escala continental, las emisiones de Q_F son pequeñas, con un promedio de 0.4 W m^{-2} en los Estados Unidos de América, 0.7 W m^{-2} en Europa occidental y 0.2 W m^{-2} en China (Flanner, 2009). Los resultados a escala de las ciudades resulta sustancialmente una mayor magnitud de Q_F .

En México no hay un estudio que evalué el calor antropogénico y su contribución al clima local.

3.3.2 Impactos en la salud

En México más de 34 millones de personas están expuestas a mala calidad del aire, debido en su mayor parte a la contaminación generada por los automóviles (INE, 2011). En el país se generan alrededor de 20 mil muertes anuales debido a la contaminación del aire y nueve mil 600 de ellas corresponden a la Zona Metropolitana del Valle de México, de acuerdo a información del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP, 2016; El Financiero, 2016; Excélsior, 2016).

Anualmente mueren 24 mil personas a causa de los accidentes viales y más de 40 mil padecen alguna consecuencia negativa. Estos causan un gasto de 126 mil millones de pesos al año, lo que representa el 1.3% del PIB nacional (Secretaría de Salud, 2008; Cervantes, 2009).

Pero al llevarse acabó la reacción de combustión, los vehículos no solo liberan gases contaminantes, sino también calor. Como ya se mencionó la liberación de calor antrópico (en éste caso vehicular) puede alterar el clima a escala local modificando el balance de energía (como lo han documentado autores antes mencionados). La alteración del balance de energía en las áreas urbanas se observa en la disminución del flujo de calor latente y aumento de calor sensible. De acuerdo con Barradas (2013) esto se traduce en un aumento de la temperatura, teniendo un impacto directo en el índice de confort térmico humano, donde indudablemente la gente puede experimentar más estrés por calor, con lo que probablemente aumentará el consumo de energía para enfriar edificios y casas-habitación, además de afectar severamente la salud humana.

Adicionalmente, estas diferencias actuales de temperatura podrían hacerse más marcadas con el cambio climático global y los golpes u ondas de calor serán mayores o se incrementarán con el efecto de la ICU. Como sucedió en el 2003 donde muchas regiones de Europa experimentaron uno de los veranos más cálidos. Francia fue uno de los países más afectados con más de 11,000 personas muertas (Mediterráneo, 2003), el exceso de mortalidad fue particularmente intensa en la zona urbana de París (Poumadere *et al.*, 2005), donde se tomó como ejemplo el papel que juegan las zonas urbanas en el clima y tiempo local.

Los trastornos producidos por calor son el resultado del fracaso de los mecanismos fisiológicos que mantienen la temperatura corporal ante una sobrecarga de calor interna o ambiental. Lo anterior se manifiesta en gravedad de los trastornos que pueden ir desde leves calambres, agotamiento y el síncope, hasta la forma más grave, que es el golpe de calor (Geosalud, 2016).

3.4 Calor antrópico e isla de calor urbana

Los entornos urbanos son a menudo más calientes que sus alrededores. La zona urbana altera el microclima original debido a la modificación de los componentes originales del suelo, lo cual lleva consigo a cambios en las propiedades físicas y químicas, alterándose principalmente el balance de energía (Barradas, 1987).

La mayoría de las ciudades son fuentes de calor y de contaminación, y la estructura térmica de la atmósfera por encima de ellos se ve afectada por el efecto "isla de calor". Una ICU es mejor visualizado como una cúpula de aire caliente estancado en las áreas densamente urbanizadas de las ciudades (Emmanuel, 2005). El calor que se absorbe durante el día por los edificios, carreteras y otras construcciones en una zona urbana se reemite después de la puesta del sol, creando diferencias de alta temperatura entre las zonas urbanas y rurales (Jáuregui, 1997; Asimakopoulos *et al.*, 2001; Ballinas y Barradas, 2016).

Cervantes *et al.*, (2001), realizó recorridos en un vehículo instrumentado (estación móvil) a lo largo de la avenida de Los Insurgentes (longitud aproximada de 40 km) en la Ciudad de México, en tres épocas climáticas diferentes. Se encontró que la temperatura presentaba cambios en función del uso del suelo. La figura 3 muestra las distribuciones de la temperatura del aire en tres épocas del año contrastantes. En esta figura es notorio el aumento de la temperatura que se registra en la zona altamente urbanizada o central, como es el caso de la Glorieta de los Insurgentes y el cruce con Paseo de la Reforma (que coincide con la isla de calor), pero también se aprecia el efecto de las áreas verdes (isla fría) como El Pedregal de San Ángel, reserva ecológica de la UNAM, o aun el de parques de áreas relativamente pequeñas como es el caso de la Bombilla (monumento Álvaro Obregón) y el Parque Hundido.

La diferencia de la temperatura de la ICU en la Ciudad de México puede ser tan alta como de 6 a 7 °C en promedio horario con respecto a sus alrededores, pero también puede ser establecida durante el día con intensidades de hasta 10 °C (Ballinas, 2011). La figura 4 muestra la distribución espacial de la temperatura

media del mes de mayo, a las dos de la tarde (hora local), se observa que el núcleo cálido se encuentra en la parte noroeste de la Ciudad de México.

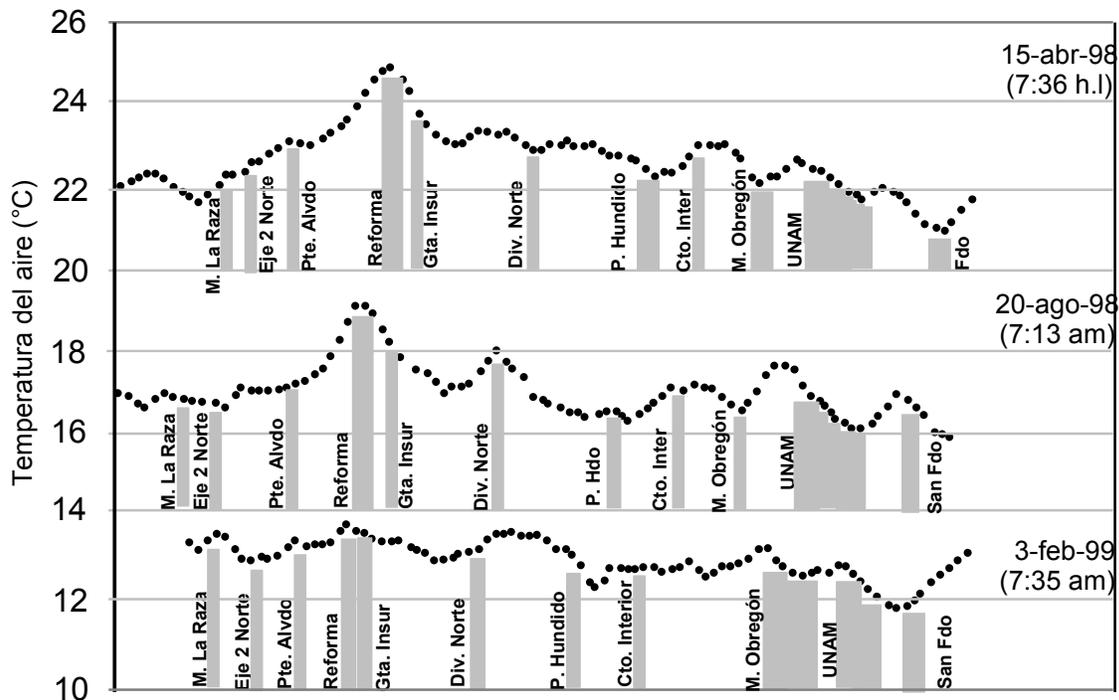


Figura 3. Distribución de la temperatura a lo largo de la Avenida de los Insurgentes en la Ciudad de México, desde la Avenida San Fernando hasta el Monumento a La Raza, en días típicos de la temporada calurosa (15 de abril de 1998), lluviosa (20 de agosto de 1998) y fría (3 de febrero 1999) (modificado de Cervantes *et al.*, 2001).

La rápida urbanización conduce al desarrollo de la ICU, Oke (1981) agrupa estas causas en las siguientes cinco categorías, cada una de las cuales representa el cambio en el entorno urbano pre consecuencia de una urbanización:

- (1) El calor antropogénico;
- (2) La contaminación del aire;
- (3) La impermeabilización superficial;
- (4) Las propiedades térmicas del tejido urbano;
- (5) La geometría de la superficie.

Como se menciona anteriormente el calor residual producido por las actividades humanas es un colaborador de la ICU. Aunque el Q_F varía espacial y temporalmente (diurna, estacional y anual) (Lee *et al.*, 2009), bajo ciertas condiciones puede exceder la recepción de energía de la radiación neta.

Los valores típicos oscilan entre 20 y 70 $W m^{-2}$ (Crutzen, 2004), pero los valores se han calculado hasta mayores de 1000 $W m^{-2}$ en condiciones extremas localizada, por ejemplo, en la parte más densa de Tokio en la hora de más demanda de aire acondicionado (Ichinose *et al.*, 1999).

La mayor parte de la energía utilizada por las actividades antrópicas, inmediatamente se disipa como calor, ya sea por procesos de conversión ineficiente o para servir al propósito de calefacción.

La ICU, que es un fenómeno bien conocido en las ciudades, puede ser influenciada no sólo por factores físicos y geométricos urbanos, tales como la longitud de rugosidad, inercia térmica, relación de aspecto cañón y orientación, factor de vista de cielo (sky view factor, SKF), superficie de la ciudad, y tamaño de la población, sino también por las condiciones meteorológicas, tales como la velocidad del viento, la nubosidad, la humedad relativa, la estabilidad de la capa límite atmosférica y la advección (Vukovich, 1971; Oke, 1973; Oke y Maxwell, 1975; Bornstein, 1975; Barradas, 1987; Seaman *et al.*, 1989; Yoshikado 1992; Eliasson 1996; Klysik y Fortuniak 1999; Kim y Baik 2002; Atkinson 2003).

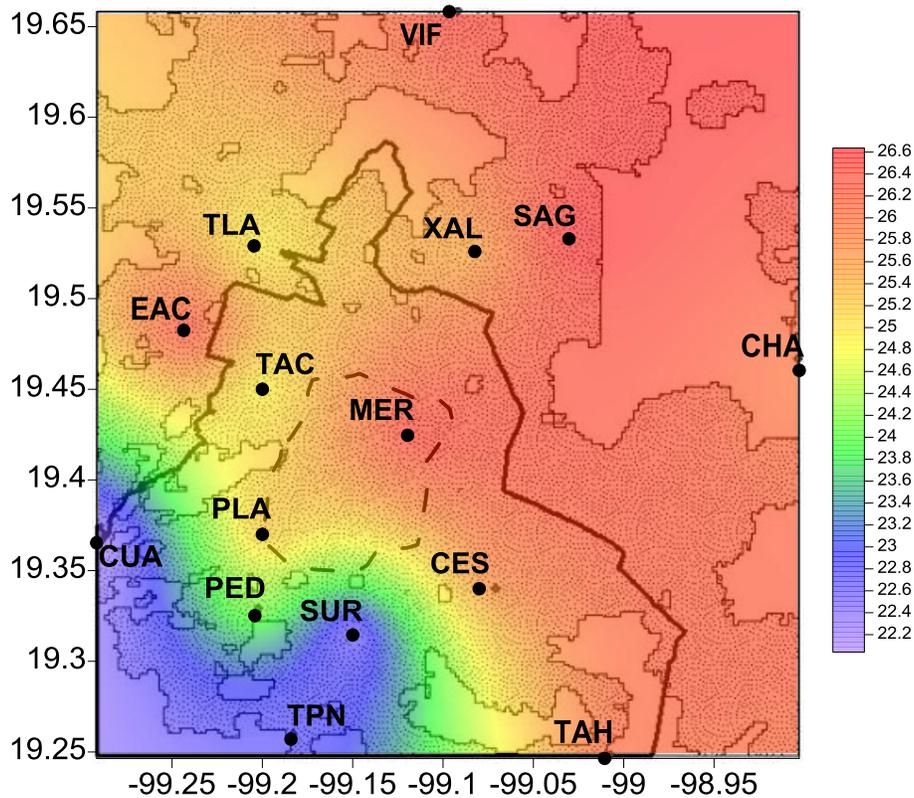


Figura 4. Distribución promedio de la temperatura del aire a las 14:00 horas en mayo 2009, según Ballinas y Barradas (2016).

El fenómeno de la ICU es uno de los aspectos más importantes del clima urbano, siendo la cantidad de población urbana y su distribución en el tejido urbano variables fundamentales en la generación de la misma. La edificación es un sector de gran influencia en la evolución del consumo de energía y las emisiones de CO₂. En el conjunto de la Unión Europea, los edificios son responsables del 40% del consumo total de energía y del 36% de las emisiones de dióxido de carbono (WWF - España 2010).

El Q_F puede ser un componente importante en el balance energético urbano, y es de particular importancia en la hora de transición y las temporadas en que su magnitud puede rivalizar con la del flujo solar incidente. Varios estudios han tratado de cuantificar el flujo de calor antropogénico en las zonas urbanas.

Por lo anterior la estimación precisa de la emisión de Q_F es de primordial importancia en la investigación de las circulaciones locales, ambiente térmico

local, y los problemas de contaminación asociados. La emisión de calor antropogénico depende básicamente de consumo de energía en el área de interés (Lee S.H., *et al* 2009).

4 Área de estudio

4.1 Ubicación

El área de estudio está ubicada en la Ciudad de México, en la delegación Coyoacán (Figura 5). La cual se encuentra entre los paralelos 19° 18' y 19° 21' de latitud norte; los meridianos 99° 06' y 99° 12' de longitud oeste y una altitud entre 2200 – 2400 msnm. Colinda al norte con las delegaciones Álvaro Obregón, Benito Juárez e Iztapalapa; al este con las delegaciones Iztapalapa y Xochimilco; al sur con la delegación Tlalpan; al oeste con la delegación Álvaro Obregón. Ocupa el 3.6% de la superficie del Distrito Federal. Cuenta con una localidad y una población total de 628,063 habitantes (INEGI, 2009).

El segmento donde se analizó el tráfico vehicular es una sección de la Avenida Henríquez Ureña (Eje 10 Sur), debido que ya existía un trabajo previo con respecto a los aforos vehiculares. Dichos aforos fueron realizados por el equipo de trabajo del Dr. Arón Jazcilevich, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

En la figura 5 se muestra el segmento de estudio: A y B son los puntos donde se tomaron los videos, en dirección poniente y oriente, respectivamente; los círculos blancos son los sitios donde se llevaron a cabo los aforos vehiculares. Este segmento se escogió debido a que el número total de vehículos que entran y salen por el punto A y B recorren la misma distancia, y a que en otros segmentos el flujo neto de vehículos se veía afectado por avenidas secundarias, y el conteo para la clasificación sería afectada.



Figura 5. Área de estudio segmento de la avenida Henríquez Ureña (Eje 10 Sur, 315 m). Las letras A y B muestran los puntos donde se tomaron los videos y los puntos donde se hicieron las mediciones del aforo vehicular.

4.2 Climatología de la Ciudad de México

El clima de la Ciudad de México es tropical de montaña modificado por la altitud. Las masas de aire de origen polar que barren la cuenca en la estación seca (noviembre-abril) abaten aún más la temperatura. Al final de la época seca se registran las temperaturas más altas del año que rara vez sobrepasan los 30 °C (Jáuregui, 1995).

De acuerdo a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), a través de la modificación al sistema de clasificación climática de Köppen (García, 2004) la Ciudad de México presenta tres tipos de climas; semiárido templado, semifrío subhúmedo y templado subhúmedo (BS1k"w, Cb'w2 y Cw1), éste ultimo corresponde a la delegación Coyoacán. Las características del tipo de clima Cw1 son: temperatura media para el mes más frío entre -3 y 18° C; precipitación del mes más húmedo de la mitad del año en que está el verano mayor de diez veces la del mes más seco, precipitación del mes más seco menor de 40 mm y precipitación anual mayor que la que constituye el límite de los climas secos *B* y menor que el límite de los climas Semicálidos húmedos (*Cm*). Presenta con una precipitación normal anual de 839 mm.

Las Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, de la estación Campo Experimental Coyoacán (clave: 00009070), latitud: 19°21'05" N., longitud: 099°10'20" W., con un periodo de registro 1951-2010, registra en esta delegación una temperatura máxima promedio de 25 a 27 °C en los meses de marzo a mayo, con una temperatura mínima promedio de 2 a 5 °C en los meses de diciembre a febrero.

5 Metodología

5.1. Modelo de calor antrópico vehicular

Es evidente que existe un fuerte ciclo diurno de tráfico, lo que está bien documentado en los datos analizados para este trabajo, con incrementos importantes durante la mañana y la tarde. Los patrones de tráfico en general no varían entre las estaciones (Sailor and Lu, 2004).

La emisión de calor a partir de la combustión por hora de vehículos Q_V se calcula de (Grimmond, 1992):

$$Q_V = [\sum_{i,j,k} (n_{vij,k}(h) * EV_{ij} * d_k)] / A \quad (3)$$

Donde h se refiere al tiempo en horas y $n_{vij,k}$ es el número de vehículos en área fuente donde los subíndices i , j y k indican la clase de vehículo, tipo de combustible y segmento de carretera; respectivamente, por lo que $n_{vij,k}$ es el número total por hora de i vehículos de la clase que consumen tipo de combustible j y que viajan en el segmento de ruta k . d_k es la distancia del vehículo que se transportó en el segmento k (m) y EV_{ij} es la energía utilizada por el vehículo de la clase i que consume el tipo de combustible j . Este se expresa de la siguiente manera:

$$EV_{ij} = (NHC_j * \rho_j) / FE_{ij} \quad (4)$$

donde NHC_j es la combustión de calor neto del tipo de combustible j ($J \text{ kg}^{-1}$); ρ_j es la densidad del tipo de combustible j (kg L^{-1}); FE_{ij} es la economía promedio del combustible de los vehículos de la clase i que consumen el tipo de combustible j

(m L⁻¹). Por ejemplo, la EV de un automóvil que consume gasolina magna y una economía promedio de 13 km/L es la siguiente:

$$EV = (43300000 \text{ j kg}^{-1} * 0.720 \text{ kg L}^{-1}) / 13000 \text{ m L}^{-1} = 2398.154 \text{ j m}^{-1}$$

5.1.1 Eficiencia Térmica

Dentro de la clasificación vehicular se observaron algunos autos con aspecto de viejos, la diferencia de eficiencia térmica en autos viejos y nuevos resulta del aprovechamiento desigual del combustible. La eficiencia térmica (e) de una máquina térmica se define como la relación del trabajo neto realizado por la máquina durante un ciclo (Q_C) entre la energía absorbida a la temperatura más alta durante el ciclo (Q_h):

$$e = 1 - Q_C/Q_h \quad (5)$$

En un motor de gasolina ocurren seis procesos en cada ciclo; admisión, compresión, chispa, potencia y escape, los procesos en el ciclo pueden aproximarse por medio del ciclo de Otto. Los motores de diesel operan en un ciclo similar al ciclo de Otto, pero no emplean una chispa de bujía.

En la práctica se encuentra que todas las máquinas térmicas expelen sólo una fracción de la energía que absorben como trabajo mecánico, y que, consecuentemente, la eficiencia es menor al 100%. Diversos laboratorios e investigadores calculan la eficiencia, por ejemplo en un buen motor de automóvil tiene una eficiencia aproximadamente de 20 al 25%, en tanto que las máquinas a diesel tienen eficiencias que varían de 35 a 40% (EEC, 1995; Serwey, 2000; Princenton, 2013).

Para el 2015 Toyota tenía como objetivo mejorar aún más la eficiencia de combustible del motor mediante la utilización de otras innovaciones que incluyen un orificio de admisión con una nueva forma que genera un fuerte flujo de torbellino (lo que la mezcla de aire-combustible fluye en un remolino vertical) dentro del cilindro, y una válvula de recirculación de gases de escape (EGR, por sus siglas en inglés) se combina con la tecnología de sincronización de válvulas variable-inteligente Electric (VVT-iE) para mejorar la combustión y reducir las

pérdidas. Como resultado, se obtuvo un rendimiento térmico del 38% entre los motores producidos en masa (Toyota, 2014)

Se consideró en este trabajo que la eficiencia vehicular en las últimas décadas no ha cambiado considerablemente, por lo que la clasificación de vehículos nuevos y viejos no tiene mayor importancia en un sentido de aprovechamiento del combustible, tanto para motores de gasolina como de diesel. Por lo que la clasificación se basó sólo en el tipo de vehículo.

5.1.2 Calor de combustión neto

El calor de combustión de una sustancia es el calor de reacción que se obtiene de la oxidación de la sustancia con oxígenos molecular (Patiño, 2006). Durante el proceso de la combustión (reacción básica) se producen muchas transformaciones y reacciones químicas, dependiendo de la combustión del tipo de combustible utilizado y de las condiciones en que se realice la combustión. Básicamente, cuando se quema un hidrocarburo, el hidrógeno contenido en éste se combina con el oxígeno del aire para producir agua, el carbón se combinara con el oxígeno del aire para formar bióxido de carbono y, además, se liberará energía en forma de calor (CONAE, 2007).



Diversos estudios han calculado que el valor de calor de combustión neto para la gasolina es de alrededor de $43.239 \text{ MJ kg}^{-1}$ a $44.863 \text{ MJ kg}^{-1}$ (e.g. Grimmond, 1980; CTA, 2011; UNS, 2016). Para el gas LP, se tiene un calor de combustión neto alrededor de 45.9 MJ kg^{-1} (Rivas y Santin, 2006).

Las gasolinas Pemex-Magna, Pemex-Premium, Gas LP y Pemex-Diesel, se utilizan primordialmente como carburantes para motores de combustión interna, pero cada uno de ellos con propiedades físicas y composición química distintas, debido al tipo y concentración de los hidrocarburos presentes en cada combustible (INE, 2011).

De acuerdo a las hojas de seguridad de PEMEX, la gasolina Magna tiene un índice de octano de 87 mientras que la Premium tiene un índice de octano de 92. Dichas gasolinas se componen típicamente de moléculas de hidrocarburos en un rango de 4 a 12 átomos de carbono, formando una mezcla compleja de cientos de ellos. El mismo número de átomos de carbono puede tener estructura molecular arreglada de diferentes formas, denominados isómeros (HDS, 2011)

En un estudio de Castillo (2012) sobre el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la gasolina y diesel mexicano, encuentra que para la gasolina Magna su calor de combustión es de 43.3 MJ kg^{-1} mientras que para la Premium es de 44.5 MJ kg^{-1} y el diesel de $45. \text{ MJ kg}^{-1}$.

5.1.3 Tipo de combustible

El tipo de combustible se consideró de acuerdo a un estudio que realizó la Secretaría de Energía (SENER) en colaboración con la Agencia Internacional de Energía (AIE), México en 2011. Un proyecto donde se realizaron estadísticas energéticas, balances, encuestas e indicadores (SENER, 2011).

De acuerdo a la encuesta realizada el autotransporte representó la modalidad con mayor consumo de combustible. En 2010 el total de los vehículos (automóviles, autobuses y motocicletas) estuvo compuesto por 85.1% de gasolina, 14.0% de diesel y 0.9% de gas LP. De estos porcentajes los vehículos consumieron durante 2010, 84.6% del combustible utilizado por el autotransporte, de los cuales únicamente el 1.1% correspondió a diesel y 0.7% a gas LP, en tanto que el 98.2% restante fue consumo de gasolina.

Las motocicletas consumieron 1.1% por autotransporte de los cuales el 100% correspondió a consumo de gasolina. Finalmente, el consumo por autobús representó el 14.3%, de los cuales el 2.2% correspondió a gas LP, 6.1% a gasolina y el 91.7% a diesel (Fig. 6).

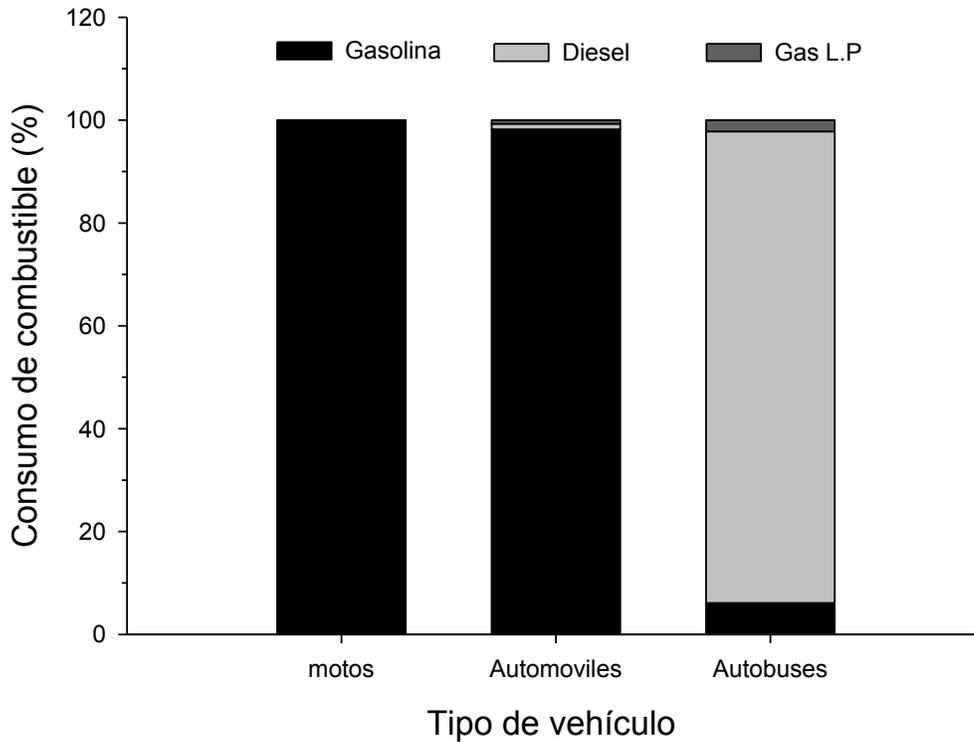


Figura 6. Porcentaje de consumo de combustible de acuerdo al tipo de vehículo, (modificado de SENER, 2011).

PROFECO año con año realiza diversas encuestas sin ser las mismas. En octubre del 2005 PROFECO realizó una encuesta sobre el consumo de gasolina en varios estados, uno de ellos fue la Ciudad de México, donde el 76% de los encuestados utiliza solo gasolina Magna para su vehículo, el 17% Premium y 5% ambas (Encuesta, 2005)

El consumo de tipo de combustible para cada clase de vehículo, se aplicó al número de vehículos en las diferentes horas, de acuerdo al porcentaje de consumo de cada clase, como se menciona en las encuestas.

5.1.4 Densidad del combustible

Un combustible es cualquier sustancia que causa una reacción con el oxígeno de forma violenta, con producción de calor, llamas y gases. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable. En general se trata de algo susceptible de quemarse y producir energía calorífica (Rivas, 2006).

Las gasolinas comerciales en México son PEMEX Magna y PEMEX Premium, se elaboran mediante el mezclado de diferentes corrientes de procesos provenientes de la refinación del petróleo. La cantidad en que cada una de estas corrientes se incorpora en la mezcla final, depende de su calidad y costo unitario.

La densidad ayuda a definir la calidad de la gasolina; cuando su valor es bajo, la gasolina contiene hidrocarburos de bajo peso molecular que representan moléculas de cuatro a siete carbonos. Si el valor de la densidad es alto, la gasolina es pesada y contiene hidrocarburos con ocho y hasta doce carbonos en la molécula. De acuerdo con Hernández (2011) la densidad de la gasolina Magna es de 720 kg m^{-3} a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Para la Premium se tiene una densidad de 705.7 kg m^{-3} a la misma temperatura. El diesel se tiene una densidad de 836.7 kg m^{-3} a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y el gas LP tiene una densidad de 540 kg m^{-3} (Rivas y Santin 2006; Castillo, 2011).

Grimmond (1980), obtuvo tres promedios de densidad en la gasolina de Estados Unidos de América; Premium sin plomo 755 kg m^{-3} , regular sin plomo 730 kg m^{-3} y regular con plomo 720 kg m^{-3} .

5.1.5. Economía del combustible

El rendimiento de combustible de un automóvil es la relación entre la distancia recorrida y la cantidad de combustible consumido por el vehículo. Unidades de distancia por unidad fija de combustibles: En los automóviles es la distancia recorrida por unidad de combustible utilizado, por lo general en millas por galón (mpg) o en kilómetros por litro (km L^{-1}).

La composición de la flota vehicular proporciona información acerca del tipo de vehículos (de acuerdo a su carrocería) que circula una región; es decir, si son

vehículos automotores compactos y/o subcompactos, SUV, VAN o pick up. Esta clasificación del parque vehicular es importante, debido a que cada tipo de vehículo tiene características técnicas particulares, como peso, número de cilindros y tipo de combustible que utilizan, entre otros, los cuales influyen directamente en el rendimiento del combustible (INE, 2011).

Con base en lo anterior se realizó una clasificación del rendimiento de combustible, en donde vehículos que presentaron características similares se les consideró como vehículos ligeros, es decir autos de 4 cilindros y un peso vehicular que va de los 900 a 1300 kg. La tabla 2 muestra los principales modelos vehiculares que circulaban en el año de estudio.

Para la clasificación del rendimiento de combustible en vehículos medianos se consideraron vehículos de cuatro y seis cilindros, debido a las características de tamaño que presentaban, por ejemplo: la camioneta Journey 4CIL con un peso de 1,748 kg y Voyager 6CIL con 1,855 kg presentan un rendimiento de combustible casi similar con 8.18 y 8.07 km L⁻¹ respectivamente (Tabla 3). El peso vehicular para la categoría de medianos va de los 1,300 a 2,300 kg.

Para los vehículos pesados se consideraron vehículos de ocho cilindros, categoría que incluye camionetas del tipo cerradas como la Durango de Dodge, y de batea como la Ford Lobo (Tabla 4), con un peso vehicular superior a 2,300 kg.

Tabla 2. Rendimiento de combustible en ciudad para vehículos ligeros (Eco-vehículos, 2016).

Marca	Modelo	Año modelo	Rendimiento en ciudad (km L ⁻¹)	Rendimiento promedio (2008-2010) en ciudad (km L ⁻¹)
CHEVROLET	CHEVY HATCHBACK 3PTS 1.6L 4CIL 100HP	2008-2010	13.95-14.32	14.14
CHEVROLET	CORSA 4 PTS L4 CIL. MAN	2008-2009	12.40-13.26	12.83
CHEVROLET	AVEO 4 PTS. 4 CLDS	2008-2010	14.64-12.88	13.76
DODGE	ATOS 1.1L BASICO	2008-2009	15.71-18.43	17.07
DODGE	ATTITUDE 1.4L GL 4DRS MT	2008-2010	12.5-13.75	13.13
FORD	FIESTA TREND CONFORT	2008-2010	10.75-10.40	10.58
FORD	FOCUS AMBIENTE TM	2008-2010	10.20-11.50	10.85
CHRYSLER	CIRRUS 4L CIL. AUT.	2008-2010	10.15.-10.15	10.15
HONDA	CIVIC COUPE EX	2008-2010	12.90-13.50	13.20
NISSAN	APRIO APRIO MT	2008-2010	13.20-13.20	13.20
NISSAN	SENTRA	2008-2010	13.30-13-30	13.30
NISSAN	TIIDA SEDAN	2008-2010	12.70-13.0	12.85
NISSAN	TSURU GSI	2008-2010	13.80-12.70	13.25
NISSAN	ALTIMA S(B), S AND SL	2008-2010	11.05-12.20	11.63
PEUGEOT	206 BERLINA 1.4 L 4 CIL 75 HP MT	2008-2010	11.76-11.76	11.76
RENAULT	CLIO 5 PTAS	2008-2010	13.90-13.90	13.90
RENAULT	MEGANE II 5 PTAS.	2008-2009	15-20-15.20	15.20
SEAT	CORDOBA 4 PTS. 4L CIL.1.6 100 HP.	2008-2009	12.36-12.36	12.36
SEAT	IBIZA 4 PTS. 4L CIL. 1.6, 100 HP.	2008-2010	12.70-12.75	12.73
SEAT	LEON 4 PTS. 4L CIL. 2.0, 200 HP.	2008-2010	11.25-10.0	10.63
TOYOTA	COROLLA 1.8 L 4 CIL 126 HP	2008-2010	13.60-11.5	12.55
TOYOTA	YARIS HATCHBACK 5DR	2008-2010	17.00-17.00	17.00

Los datos de rendimiento se obtuvieron principalmente del portal de indicadores de eficiencia energética y emisiones vehiculares, a cargo del INECC, CONUEE y PROFECO (Eco-vehículos, 2016), para la clasificación de peso se determinó a través de la revisión de fichas técnicas en diferentes modelos, por medio de las páginas de internet de diferentes marcas de vehículos (Nissan, Chevrolet, Honda y Toyota).

Tabla 3. Rendimiento de combustible de vehículos medianos en ciudad (Eco-vehículos, 2016).

Marca	Modelo	Año del modelo	Rendimiento en ciudad (km L ⁻¹)	Rendimiento promedio (2008-2010) en ciudad (km L ⁻¹)
CHEVROLET	EQUINOX 4 PTS. V6 CIL	2008-2009	9.14-9.02	9.08
CHEVROLET	TRACKER 4 PTS. 4CIL.	2008-2010	9.14-10.9	10.02
CRYSLER	VOYAGER 6V CIL. AUT.	2008	8.18	8.18
DODGE	JOURNEY 2.4 L 4 CIL 173 HP	2009-2010	8.07	8.07
DODGE	AVENGER 2.4L SE ATX 2008	2008-2010	9.6	9.60
FORD	ECOSPORT AUTOMATICA	2008-2010	10.80-9.60	10.20
FORD	ESCAPE	2008-2010	9.35	9.35
FORD	ESCAPE 3.0L 6CIL 240HP AUT	2008-2010	9.35-10.20	9.78
HONDA	CR-V EX-L 4WD 2.4L 4CIL 175 HP AUT	2008-2010	10.4-10.30	10.35
JEEP	LIBERTY 6V CIL. AUT.	2008-2010	8.05	8.05
JEEP	PATRIOT 4L CIL.	2008-2010	10.96	10.96
JEEP	COMPASS 4L CIL.	2008-2010	10.5	10.50
MAZDA	MAZDA5	2008-2010	11.6	11.60
NISSAN	X-TRAIL 4X2	2008-2010	11.50-12.10	11.80
NISSAN	NP 300 CHASIS 4X2 DIESEL 2PTS 2.5L 4CIL 131HP MAN	2010	10.94	10.94
RENAULT	TRAFIC VP	2008-2010	10.6	10.60
TOYOTA	AVANZA PREMIUM MT 4CIL	2008-2010	9.09	9.09
TOYOTA	RAV4 2.4 L 4 CIL 166 HP AT	2008-2010	9.80-11.35	10.58
VW	TIGUAN 2.0 200 HP TIP	2008-2010	9.91	9.91
VW	EUROVAN CARGO VAN 3PTS 2.0L 4CIL 102 HP	2010	10.53	10.53

El rendimiento de combustible en vehículos pesados para el sector de transporte público (microbuses y autobuses), se calculó con información de la CAPUFE y de García (2010) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con información desde 1991-2006 para microbuses y para autobuses desde 1994-2006 (Tabla 5).

Tabla 4. Rendimiento de combustible en ciudad para vehículos pesados (Eco-vehículos, 2016).

Marca	Modelo	Año del modelo	Rendimiento en ciudad (km L ⁻¹)	Rendimiento promedio (2008-2010) en ciudad (km L ⁻¹)
CHEVROLET	CHEYENNE 2 PTS 8V AUTOM 4X2	2008-2010	7.14	7.14
CHEVROLET	COLORADO 2.9L 2 PTS. L4 CIL. MAN	2008-2010	8.56-9.07	8.82
CHEVROLET	SILVERADO 2500/ CHEYENNE REG CAB.2 PTS. V8 AUT.	2008-2010	7.35-7.86	7.61
CHEVROLET	SUBURBAN 5.3L 4 PTS. V8 CIL. AUT.	2008-2010	7.44-7.18	7.31
CHRYSLER	TOWN AND COUNTRY 4.0L LX 2008	2008-2010	7.82	7.82
DODGE	DAKOTA 4.7L 8V CIL. AUT.	2008-2010	5.89-7.18	6.54
DODGE	DODGE 1000 2.4L BASICA 2008	2008-2009	6.69	6.69
DODGE	DURANGO 4.7L 8V CIL. AUT.	2008-2010	6.05-5.75	5.90
DODGE	RAM 2500 4X2 8V CIL.AUT.	2008-2010	5.89	5.89
FORD	LOBO FX2 CABINA REGULAR 4X2	2008-2010	5.5-7.80	6.65
FORD	EXPEDITION EDDIE BAUER	2008-2010	5.1-7.30	6.20
FORD	EXPLORER EDDIE BAUER 4X2	2008-2010	5.50-7.90	6.70
HONDA	RIDGELINE 4WD 3.5L 6CIL 253HP AUT	2008-2010	6.9-5.80	6.35
NISSAN	ARMADA 4X2 5PTS 5.6L 8CIL 317HP AUT	2010	5.5	5.50
NISSAN	TITAN 4X2 CREW CAB	2008-2010	5.53-5.50	5.52
TOYOTA	HILUX 4X2 DOBLE CABINA	2008-2010	8.7	8.70
TOYOTA	HIGHLANDER BASE	2008-2010	7.7	7.70
TOYOTA	TACOMA SR5	2008-2010	7.65	7.65
TOYOTA	TUNDRA CREW MAX SR5 4X2	2008-2010	6.40-6.50	6.45

Tabla 5. Rendimiento de combustible en ciudad de microbuses y autobuses (CAPUFE; García, 2010)

Marca	Modelo	Año	Rendimiento en ciudad (km L ⁻¹)
CHEVROLET	MICROBUS 8 CIL	1998	2.5
CHEVROLET	MICROBUS 8 CIL	1991-1994	2.5
DODGE	MICROBUS 8 CIL	1994	2.5
CHEVROLET	MICROBUS 8 CIL	2006	2
DINA	AUTOBUS 6 CIL	1994	1.5
DINA	AUTOBUS 6 CIL	1998	2
DINA	AUTOBUS 6 CIL	2006	1.8

Finalmente los valores de rendimiento de combustible en ciudad, fueron promediados, de acuerdo al tipo de vehículo, tal y como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Rendimiento promedio de combustible en ciudad, para diferentes tipos de vehículos.

Tipo de vehículo	Rendimiento en ciudad (km L⁻¹)
Vehículos ligeros	13.00
Vehículos medianos	9.96
Vehículos pesados	7.01
Microbuses	2.38
Autobuses	1.77

5.2 Mediciones y clasificación vehicular

El grupo de investigación de Físicoquímica Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), UNAM, ha realizado diversos estudios de las fuentes de emisión de contaminantes del aire y sus efectos, como parte de una de estas investigaciones fue obtener un índice de actividad vehicular en diferentes puntos de la Avenida Henríquez Ureña (Eje 10 Sur), Cerro de Chapultepec, Cerro del Agua y Ciudad Universitaria (al lado de ingeniería).

Por lo que se obtuvieron los aforos vehiculares con sensores de ejes que detectan el paso del vehículo con base en el impulso de presión que se genera, lo que les permite contabilizar. Dentro de este índice de actividad vehicular, además de obtener los aforos también se obtuvieron videos del tránsito para los diferentes puntos. Estos videos fueron de suma importancia por ser la fuente principal de datos para la clasificación vehicular.

La selección del segmento estuvo en función principalmente de:

-Una distancia que no presentara calles secundarias, que son fuentes o sumideros de vehículos.

-Que en el segmento pueda tener un gran flujo vehicular; es decir que cuente con suficientes carriles de circulación.

-La posición de las cámaras en la avenida permitiera una mayor visualización de circulación en todos los carriles.

Otro factor que contribuyó a la selección del lugar fueron las características físicas, ya que ambas direcciones presentaron cuatro carriles, con un área aproximada de 15,582 m², incluyendo los camellones.

Se tomó como un ciclo diurno a partir de las 07:30 horas (hora calculada salida del sol) hasta las 19:40 horas (puesta del sol), con horario de verano.

Los aforos vehiculares de los puntos A y B, solo tuvieron grabaciones por dos días, seis y ocho de septiembre, de acuerdo al comportamiento vehicular diario de lunes a viernes este es prácticamente similar, por lo que se decidió analizar el día seis de septiembre.

Los videos tomados en dichos puntos, aunque no fueron continuos a lo largo del día, si representaban horas importantes de un día, por ello se analizaron con el fin de simular condiciones típicas de un ciclo diurno, por medio de las horas representativas del día.

La duración de los videos es de aproximadamente 19 minutos, en este estudio solo se analizaron 15 minutos por cada tiempo capturado, para obtener una sincronización con los aforos vehiculares.

La tabla 7 muestra las horas de análisis donde se puede observar que la hora en que se realizaron las grabaciones para ambas direcciones fue prácticamente la misma, lo que permitió analizar la emisión de forma conjunta.

Tabla 7. Tiempos de análisis de los videos para la clasificación vehicular.

Fecha	Eje 10 sur (Dirección oriente)	Eje 10 sur (Dirección poniente)
09/06/2010	07:00:00	07:15:00
09/06/2010	08:45:00	09:00:00
09/06/2010	11:45:00	12:30:00
09/06/2010	14:45:00	14:15:00
09/06/2010	18:15:00	18:00:00
09/06/2010	19:15:00	18:45:00
10/06/2010	s/d	19:30:00

Para cada video, en tiempo se reproducía y se detenía, para poder contabilizar los vehículos que pasaban por el segmento, así se tenía la oportunidad de visualizar la clase de vehículo que transitaba, y observar sus características físicas, las cuales ayudaron a asignarle el tipo y rendimiento del combustible.

Con este análisis empírico también se clasificaron las unidades por su tamaño, o si eran de transporte público o privado (Fig. 7 y 8).



Figura 7. Posicionamiento de cámara, tráfico vehicular en la Avenida Henríquez Ureña con dirección poniente a las 8:45 am el 6 de septiembre del 2010.

Por las características fisicoquímicas requeridas en el modelo de Q_F la clasificación vehicular se basó en:

-Tamaño del vehículo; con sus proporciones y apariencia física fue posible compararlo y obtener información sobre su eficiencia y rendimiento.

-Tipo de vehículo (automóvil, microbús, autobús, taxi, motocicleta, etc.).

-Combustible utilizado (gasolina, diesel, gas, etc.).

Es evidente que la cantidad de emisión de contaminantes por distancia recorrida de un autobús con motor diesel es diferente a la de un auto compacto con motor a gasolina (lo mismo se esperaría para las emisiones de calor vehicular). Esto se debe, a que las emisiones varían de acuerdo con el tipo de vehículo, uso, tipo de combustible, tipo de tecnología, tamaño del motor y edad del vehículo, entre otros factores (INECC Metodología, 2016)



Figura 8. Posicionamiento de cámara, tráfico vehicular en la Avenida Henríquez Ureña con dirección oriente a las 7:45 am el 6 de septiembre del 2010.

5.3 Generación de calor antrópico semanal

Como se mencionó anteriormente el aforo vehicular se contabilizó para una semana completa. Con las clases obtenidas de los vehículos y los datos resultantes de los aforos, se estimó Q_V para la semana completa.

El número de vehículos por clase en la semana, se obtuvo a través de los porcentajes obtenidos del día analizado de ambas direcciones, con lo que se representó el comportamiento diurno del flujo por clase de vehículo.

Con los promedios porcentuales obtenidos de cada dirección, y aplicándolo a los aforos de los diferentes días, se tuvo como resultado el ciclo semanal del tráfico vehicular para una semana típica. Esto nos permitió visualizar el comportamiento del flujo no solo por cantidad sino también por tipo de clase, además de esta manera los resultados se pueden integrar al modelo de calor antropogénico vehicular, analizando su comportamiento en las diferentes horas y días de la semana.

Para un mejor análisis, se decidió reducir el número de clases de vehículos, las cuales representaran las emisiones de Q_V en el sector vehicular. Resultaron tres clases; taxis, automóviles y microbuses, donde la clase de automóviles incluye; autos, motocicletas y camionetas, los microbuses incluyen a los autobuses.

5.4 Radiación neta

Los datos de radiación neta que se utilizaron para compararlos con Q_V , fueron medidos en la colonia Escandón, Ciudad de México (19°24'12.63" N, 99°10'34.18" W, 2245 msnm) área densamente urbanizada.

Las mediciones de Q_N se realizaron del 17 al 30 de marzo del 2006, correspondiendo a la temporada seca cálida. La estación micrometeorológica donde se midieron estos flujos se encuentra a dos cuadras de una de las avenidas más transitadas que circundan interiormente la ciudad (Avenida Patriotismo, con cinco carriles cuyo flujo es en una dirección) y a una cuadra de la avenida Benjamín Franklin (Eje 4 Sur, con cuatro carriles para cada dirección). La

radiación neta se midió con un radiómetro neto CNR1 Kipp y Zonen (Velasco *et al.*, 2009).

También se obtuvieron los valores de temperatura ambiente con fecha del mismo día del análisis para Q_v . Los datos de temperatura se adquirieron del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU). La estación que se analizó fue la del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

5.5 Hora de puesta y salida del sol

Se calculó la hora de salida y puesta del sol, para el sitio de estudio con el fin de estimar el flujo de calor Q_v tomando en cuenta el flujo radiativo neto (Q_N).

Para calcularlo se utilizaron algunas de las ecuaciones de radiación solar (ASHRAE, 1995), utilizando la siguiente ecuación:

$$LST = AST - (4\text{mins}) (LSTM - \text{Longitud}) - ET \quad (7)$$

Donde LST es la hora local estándar (por sus siglas en inglés), AST es el tiempo observado por el movimiento diario del sol, LSTM es la longitud local del meridiano de tiempo estándar y ET es la ecuación de tiempo. Un día tiene 24 horas o 1440 minutos con lo que se tiene que un grado de longitud equivale a 4 minutos.

Para obtener AST se utiliza la ecuación 6, donde los 720 minutos se refiere al tiempo aproximado de captación de luz, H_s es el ángulo horario al atardecer o amanecer, el signo negativo es para el amanecer y el positivo para la puesta del sol:

$$AST = 720 \text{ mins} + H_s (4 \text{ mins/grad}) \quad (8) \quad y$$

H_s se determinó con la siguiente ecuación:

$$H_s = \pm \arccos [-\tan(\alpha) \tan(\delta)] \quad (9)$$

donde α es la posición angular de la Tierra en la órbita dada en la ecuación 10 y δ se refiere a la declinación solar dada en la ecuación 11 (UPME, 2016):

$$\alpha = 2\pi (nd-1)/365 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \delta = & (0.006918 - 0.399912\cos\alpha + 0.070257\sen\alpha - 0.006758\cos2\alpha \\ & + 0.000907\sen2\alpha - 0.0026918\cos3\alpha \\ & + 0.00148\sen3\alpha) (180/\pi) \end{aligned} \quad (11)$$

5.6 Modelo LUCY

Se utilizó el modelo Large scale Urban Consumption of energy (LUCY) que calcula los flujos de Q_F para diferentes ciudades del mundo (Allen *et al.*, 2011). Este modelo incluye una base de datos de diferentes modelos de trabajo y días festivos, el uso de vehículos y el consumo de energía de cada país. Estima los componentes del Q_F global, con una resolución de 30" x 30" hasta 0.5° x 0.5°.

El modelo LUCY se descargó desde la página principal de Urban Micromet, London Urban Meteorological Observatory. LUCY está escrito en MATLAB y se ejecuta utilizando MATLAB Compiler Runtime (MCR). El MCR se ejecuta en 64 bits y 32 bits de Windows. Para que corriera correctamente el modelo se instaló en C.

Se calculó el Q_F en el mes de septiembre, para todo el país y así se visualizó los principales estados de mayor emisión en esa época del año.

Para el análisis de Q_F en Ciudad de México y el área de nuestro estudio se utilizó una resolución de 20'x20' y de 30"x30" respectivamente, en ambas resoluciones se utilizó GRUMP, se aplicó una fracción del 80% de los vehículos a 24 km h⁻¹, que de acuerdo a datos periodísticos y la FEMEVIC la velocidad promedio de los vehículos de 1990-2007 en Ciudad de México, era de los 17 a los 38 km h⁻¹ (IMCO, 2012; El Financiero, 2015; FIMEVIC, 2016).

Para poder obtener la media anual de Q_F en Ciudad de México, el modelo se corrió para los 365 días del año. Las coordenadas utilizadas para CDMX fueron 19.5916, -99.0693; 19.280255,-98.964259 y para el área de estudio 19.346463, -99.183066; 19.3252242, -99.161622. Se ejecutó desde LUCY_GUI_v2014a.exe el cual abre una interface gráfica del usuario (ver anexo 1).

Para el cálculo de calor antrópico metabólico, el modelo consideró tres valores de actividad metabólica, una mínima actividad de 75 W m^{-2} , máxima de 175 W m^{-2} y un valor de transición de 125 W m^{-2} (Sailor y Lu, 2004). Aplicado a los datos de población de 231 países (CIESIN, 2005). Se tomaron las horas normales de trabajo para reflejar la mayor actividad de las personas.

El calor antrópico liberado por edificación estimado por el modelo, no toma en cuenta el consumo de gas ni petróleo (Wordmaper, 2006a).

Para la estimación de calor antrópico vehicular, el modelo utiliza el promedio de automóviles, motocicletas y vehículos de transporte de mercancías (incluidos los autobuses) por cada 1,000 personas, a partir de datos recopilados originalmente en IRF World Road Statistics (Wordmaper, 2006b).

La velocidad media de los vehículos se utiliza para todas las zonas urbanas del mundo. Factores de emisión y la composición de la flota (vehículos de gasolina o diesel) se basan principalmente en los datos del Reino Unido. Sin embargo, esto puede ser alterado por un usuario. Un modelo mejorado permitiría la variabilidad en la velocidad de los vehículos entre los países, y mirar la composición de la flota y producción de calor de los vehículos en diferentes países.

La mayor parte de información de consumo energético, densidad de población y tráfico vehicular utilizada por el modelo, fue recogida de sitios web (ver anexo 1).

6. Resultados y Discusión

6.1 Calor antrópico vehicular de un día típico

En promedio, el número de autos que transitan en un día (lunes- viernes) para ambos carriles fue de 70,310 unidades de los cuales 53,548 circularon en el horario diurno (7:00 a 20:00 horas), donde 11,252 fueron taxis, 40,889 automóviles y 1,407 fueron microbuses y autobuses. Para el promedio diurno de fin de semana, resultó que circularon alrededor de 37,915 unidades de donde 7,977 fueron taxis, 28,935 automóviles y 1001 microbuses y autobuses.

Con los requerimientos del modelo de calor antropogénico con base en las características de consumo de combustible entre otras propiedades, se construyeron siete tipos de clases de vehículos. En la tabla 8 muestra la cantidad y características propias de las unidades, para ambas direcciones.

La clasificación también proporcionó el número de vehículos para cada clase, las tablas 9 y 10 muestran esta clasificación la cual permitió no solo la obtención de Q_V si no también, el porcentaje de vehículos para cada clase.

Tabla 8. Número de vehículos por clase, características de consumo, rendimiento y eficiencia térmica.

	Clase de vehículo	Número de vehículos	Segmento (m)	Rendimiento en ciudad (km L ⁻¹)	Tipo de combustible	Eficiencia térmica (%)
Vehículos ligeros	Taxis	1309	315	13.00	Gasolina	20-25
	Privados	3709	315	13.00	Gasolina	20-25
	Motocicletas	19	315	47.00	Gasolina	S/D
Vehículos medianos	Privados (4 y 6 CIL)	1050	315	9.96	Gasolina	20-25
	Privados (8 CIL)	36	315	7.01	Gasolina	20-25
Vehículos pesados	Microbuses	81	315	2.38	Diesel/Gas L.P/Gasolina	30-35
	Autobuses	72	315	1.77	Diesel/Gas L.P/Gasolina	30-35

Tabla 9. Número de vehículos de acuerdo al tipo de clase, dirección oriente.

Fecha	Hora del día	Vehículos ligeros			Vehículos medianos		Vehículos grandes		Total
		Taxis	Automóviles	Moto-cicletas	Camionetas (4 y 6 CIL)	Camionetas (8 CIL)	Microbús	Autobús	
09/06/2010	07:00:00	87	217	2	85	4	7	6	408
09/06/2010	08:45:00	81	201	2	71	3	7	5	370
09/06/2010	11:45:00	78	198	2	68	1	5	5	357
09/06/2010	14:45:00	111	299	3	79	2	8	7	509
09/06/2010	18:15:00	112	310	1	82	1	8	6	520
09/06/2010	19:15:00	116	329	3	89	3	7	6	553

Tabla 10. Número de vehículos de acuerdo al tipo de clase, dirección poniente.

Fecha	Hora del día	Vehículos ligeros			Vehículos medianos		Vehículos grandes		Total
		Taxis	Automóviles	Moto-cicletas	Camionetas (4 y 6 CIL)	Camionetas (8 CIL)	Microbús	Autobús	
09/06/2010	07:15:00	135	455	1	99	5	9	8	712
09/06/2010	09:00:00	119	398	1	87	3	6	5	619
09/06/2010	12:30:00	91	260	1	82	2	6	6	448
09/06/2010	14:15:00	113	338		81	2	7	7	548
09/06/2010	18:00:00	96	265		84	3	6	6	460
09/06/2010	18:45:00	92	242		73	1	5	4	417
09/06/2010	19:30:00	78	197	2	70	2	4	6	359

La tabla 11 muestra las propiedades fisicoquímicas de los combustibles utilizados en la obtención de Q_v , para cada clase de vehículo.

Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas de la gasolina

Características del combustible		
Tipo	Densidad (kg L ⁻¹)	Calor de combustión neto (X10 ⁶ j kg ⁻¹)
Gasolina Magna	.720	43.3
Gasolina Premium	.705	44.5
Gas L.P.	.540	45.9
Diesel	.8367	45.0

Las tablas 12 y 13 describen los resultados de Q_v para cada clase de vehículo, en las horas representativas del día 6 de septiembre de 2010. Se aprecia que en la dirección oriente la mayor emisión de calor se da por la tarde (alrededor de las 19:00 horas) alcanzando los 8.9 W m⁻², mientras que para la dirección poniente la máxima emisión se da en la mañana con 11.5 W m⁻² (alrededor de las 07:00 horas).

Tabla 12. Calor antropogénico observado, de acuerdo al conteo y clasificación vehicular del día 6 de septiembre 2010. Dirección oriente

Fecha	Hora del día	Taxis	Automóviles	Microbús y Autobús	Q_v (W m ⁻²)
09/06/2010	07:00:00	1.1716	4.5070	1.2962	6.9748
09/06/2010	08:45:00	1.0908	4.0254	1.1805	6.2967
09/06/2010	11:45:00	1.0504	3.8933	1.0085	5.9522
09/06/2010	14:45:00	1.4948	5.4719	1.4979	8.4645
09/06/2010	18:15:00	1.5082	5.6461	1.3822	8.5365
09/06/2010	19:15:00	1.5621	6.0718	1.2962	8.9301

Tabla 13. Calor antropogénico observado, de acuerdo al conteo y clasificación vehicular del día 6 de septiembre 2010. Dirección poniente

Fecha	Hora del día	Taxis	Automóviles	Microbús y Autobús	Q_v (W m ⁻²)
09/06/2010	07:15:00	1.8180	8.0368	1.7119	11.5666
09/06/2010	09:00:00	1.6025	7.0032	1.1024	9.7082
09/06/2010	12:30:00	1.2254	5.0201	1.2189	7.4645
09/06/2010	14:15:00	1.5217	6.0559	1.4221	8.9996
09/06/2010	18:00:00	1.2928	5.1443	1.2189	7.6560
09/06/2010	18:45:00	1.2389	4.5891	0.8993	6.7273
09/06/2010	19:30:00	1.0504	3.9589	1.0456	6.0549

Las tablas anteriores también muestran que la mayor emisión de Q_v para ambas direcciones, es generada por automóviles y que a pesar de que el número de taxis es mucho mayor que el de microbuses, éstos pueden generar prácticamente la misma cantidad de calor vehicular. Debido principalmente al diferente consumo de combustible y a sus propiedades químicas.

6.2 Calor antrópico vehicular durante una semana

En las tablas 14 y 15 se muestra el porcentaje para cada clase de vehículo, se puede observar que los valores para clase no varían considerablemente, por lo que se decidió obtener un promedio porcentual.

Tabla 14. Porcentajes obtenidos para cada tipo de vehículo con dirección oriente.

Fecha	Hora del día	Vehículos ligeros (%)			Vehículos medianos (%)		Vehículos grandes (%)	
		Taxis	Automóviles	Motocicletas	Camionetas (4 y 6 CIL)	Camionetas (8 CIL)	Microbús	Autobús
09/06/2010	07:00:00	21.324	53.186	0.49	20.833	0.98	1.716	1.471
09/06/2010	08:45:00	21.892	54.324	0.541	19.189	0.811	1.892	1.351
09/06/2010	11:45:00	21.849	55.462	0.56	19.048	0.28	1.401	1.401
09/06/2010	14:45:00	21.807	58.743	0.589	15.521	0.393	1.572	1.375
09/06/2010	18:15:00	21.538	59.615	0.192	15.769	0.192	1.538	1.154
09/06/2010	19:15:00	20.976	59.494	0.542	16.094	0.542	1.266	1.085
Promedio porcentual		21.564	56.804	0.486	17.742	0.533	1.564	1.306

Tabla 15. Porcentajes obtenidos para cada tipo de vehículo con dirección poniente.

Fecha	Hora del día	Vehículos ligeros (%)			Vehículos medianos (%)		Vehículos grandes (%)	
		Taxis	Automóviles	Motocicletas	Camionetas (4 y 6 CIL)	Camionetas (8 CIL)	Microbús	Autobús
09/06/2010	07:15:00	18.961	63.904	0.14	13.904	0.702	1.264	1.124
09/06/2010	09:00:00	19.225	64.297	0.162	14.055	0.485	0.969	0.808
09/06/2010	12:30:00	20.313	58.036	0.223	18.304	0.446	1.339	1.339
09/06/2010	14:15:00	20.62	61.679	0	14.781	0.365	1.277	1.277
09/06/2010	18:00:00	20.87	57.609	0	18.261	0.652	1.304	1.304
09/06/2010	18:45:00	22.062	58.034	0	17.506	0.24	1.199	0.959
09/06/2010	19:30:00	21.727	54.875	0.557	19.499	0.557	1.114	1.671
Promedio porcentual		20.54	59.776	0.155	16.616	0.492	1.21	1.212

La figura 9 muestra el comportamiento de flujo vehicular para dirección oriente y poniente del 5 al 11 de septiembre, se observa que el flujo es mayor en la mañana en dirección poniente y por la tarde se vuelve mayor en dirección oriente, sumando ambas direcciones tienen dos picos importantes (mañana y tarde) y un sumidero alrededor del medio día. Aplicando el porcentaje vehicular obtenido a la base de datos de aforo semanal, se tiene que el parque vehicular es dominado en

número por los automóviles, quedando los taxis en segundo lugar por último los microbuses y autobuses (Fig. 10).

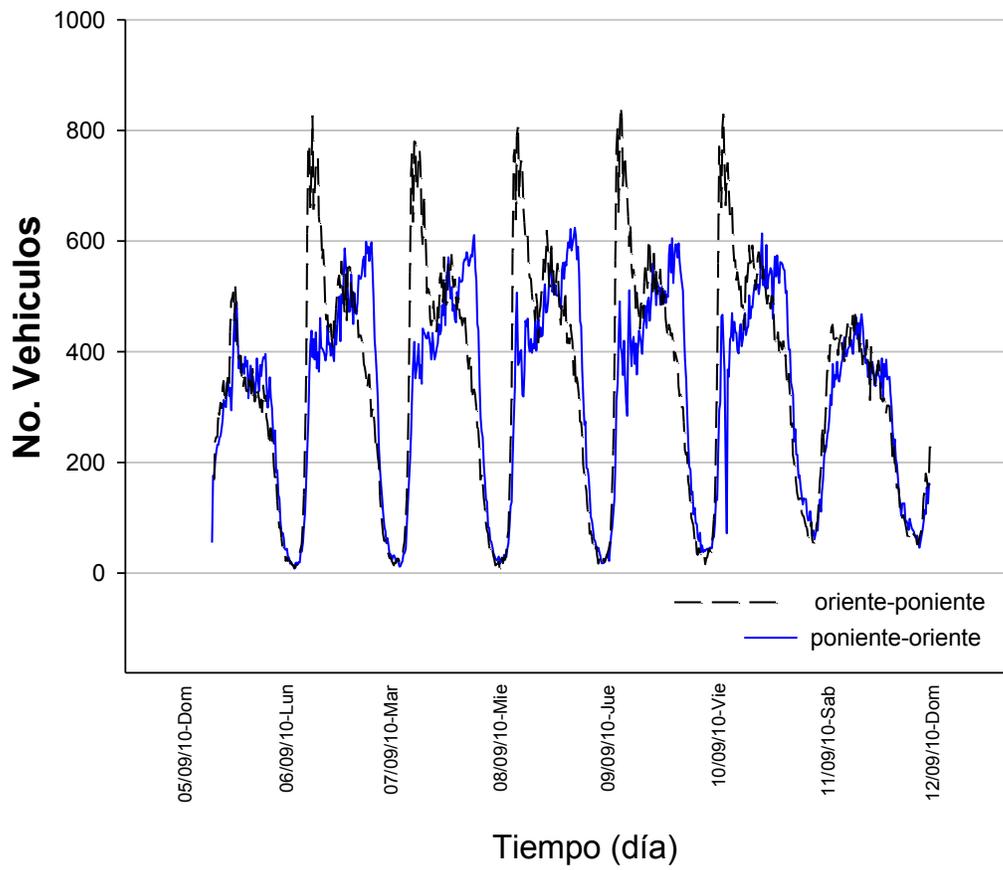


Figura 9. Aforo vehicular en avenida Pedro Henríquez Ureña (Eje 10 Sur) entre las calles Cerro del Agua y Delfín Madrigal, dirección oriente-poniente y poniente-oriente)

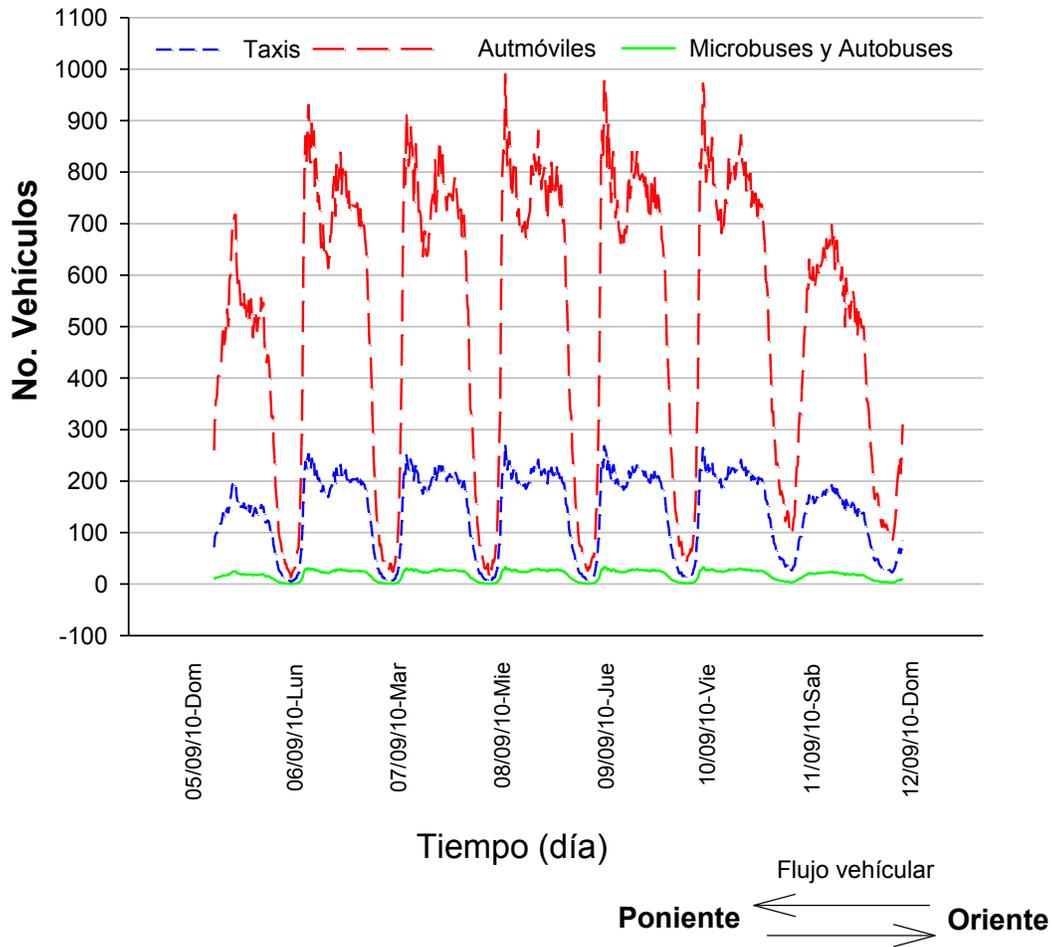


Figura 10. Comportamiento del flujo vehicular por tipo de clase vehicular (suma de ambas direcciones).

La figura 11 muestra que la mayor emisión de calor vehicular se da por la mañana, donde se llegan a superar los 13 W m^{-2} , éste comportamiento indica que por las mañanas la mayoría de las personas se integran a la UNAM o avenida Universidad, y entran más de las que salen, ya que por la mañana el flujo es menor en dirección oriente pero por la tarde la mayoría de las personas regresan por esta última. La figura 12 muestra que contrario a la dirección poniente, la mayor emisión de Q_v se da por la tarde, con valores por encima de los 9 W m^{-2} (18:30 a 20:30), aunque éste es menor que en la mañana con respecto a la

dirección poniente, este comportamiento solo nos está indicando que las personas toman rutas alternas para su regreso.

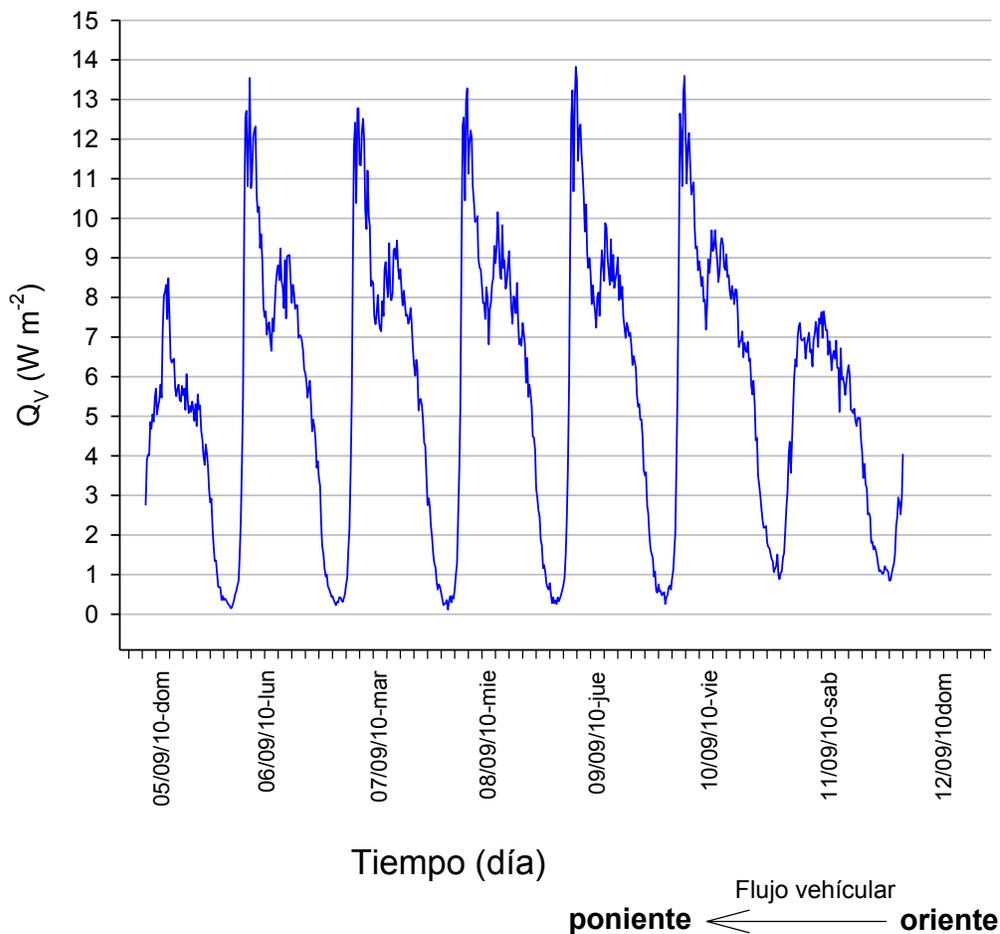


Figura 11 Flujo de calor antropogénico vehicular (Q_v) con dirección oriente-poniente.

Considerando la emisión en ambas direcciones, se observa que el comportamiento de Q_v presenta dos momentos importantes de emisión (figura 13), uno durante la mañana donde alcanza valores por encima de los $20 W m^{-2}$, y otro en el transcurso de la tarde-noche el cual mantiene la emisión del Q_v durante un mayor tiempo, con valores oscilando entre 15 y $18 W m^{-2}$.

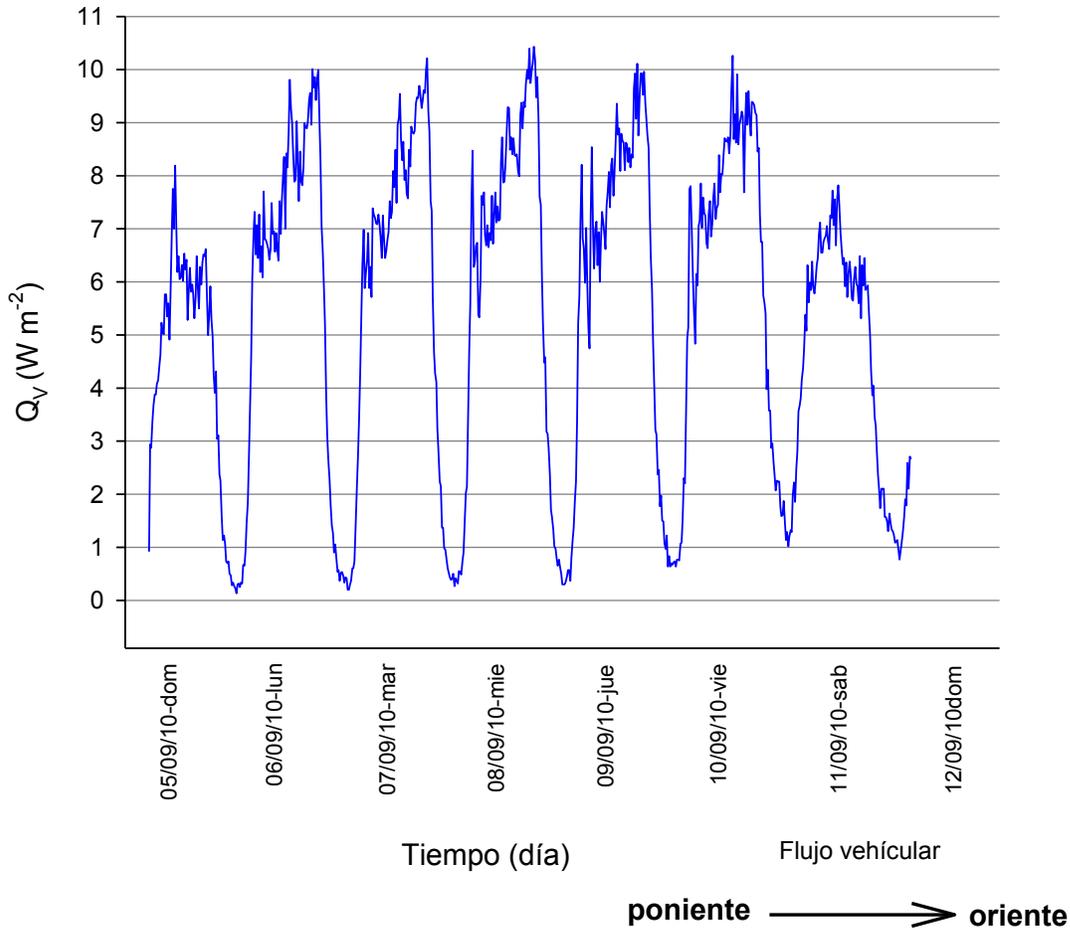


Figura 12. Flujo de calor antropogénico vehicular (Q_v) con dirección poniente-oriente.

En un promedio diario de Q_v (lunes-viernes), con horario diurno, éste tiene un valor medio de alrededor de 17 W m^{-2} , donde; los taxis emiten el 2.8 W m^{-2} , los automóviles 11.1 W m^{-2} y los microbuses 2.7 W m^{-2} . Mientras que para el fin de semana en el mismo horario, el valor medio diario es de 12 W m^{-2} donde; los taxis emiten 2 W m^{-2} , los automóviles 8 W m^{-2} y los microbuses 1.9 W m^{-2} .

La figura 14 muestra el comportamiento típico de un día de la semana laboral y uno de fin de semana (lunes y sábado). Contrario al comportamiento de lunes a viernes donde el descenso de Q_v ocurre entre las 10:00 y 13:00 horas, para fines de semana el incremento se da alrededor de las horas mencionadas

anteriormente, teniendo máximos que logran superar los 14 W m^{-2} , valor que es similar al máximo descenso de Q_V durante la semana laboral.

Por otro lado, los valores de Q_V en la madrugada del día lunes son superados por los valores del día sábado con una diferencia promedio de 2.7 W m^{-2} (01:00 hasta las 05:00 horas). Lo anterior es lógico, debido a las actividades nocturnas de los capitalinos. Sin embargo la actividad de emisión de Q_V sigue siendo mayor durante las horas laborales de la semana.

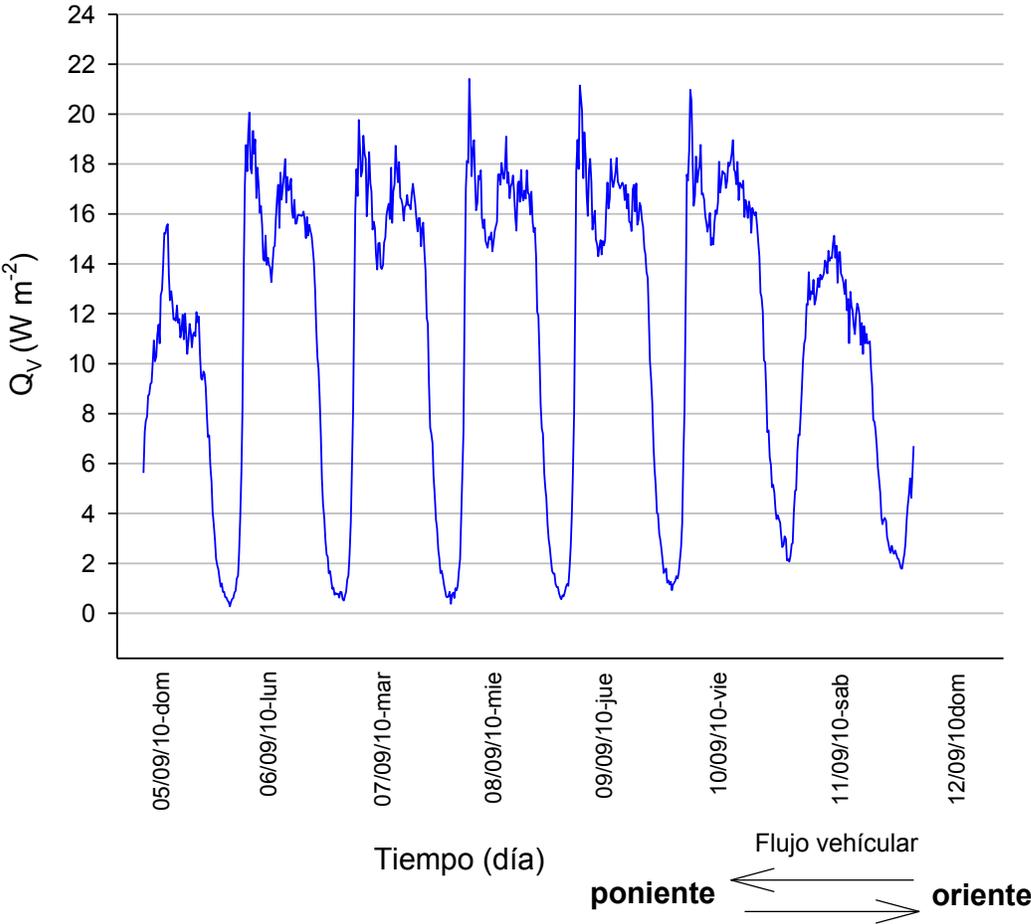


Figura 13. Flujo de calor antropogénico vehicular (Q_V), en ambas direcciones del 5 al 12 de septiembre del 2010.

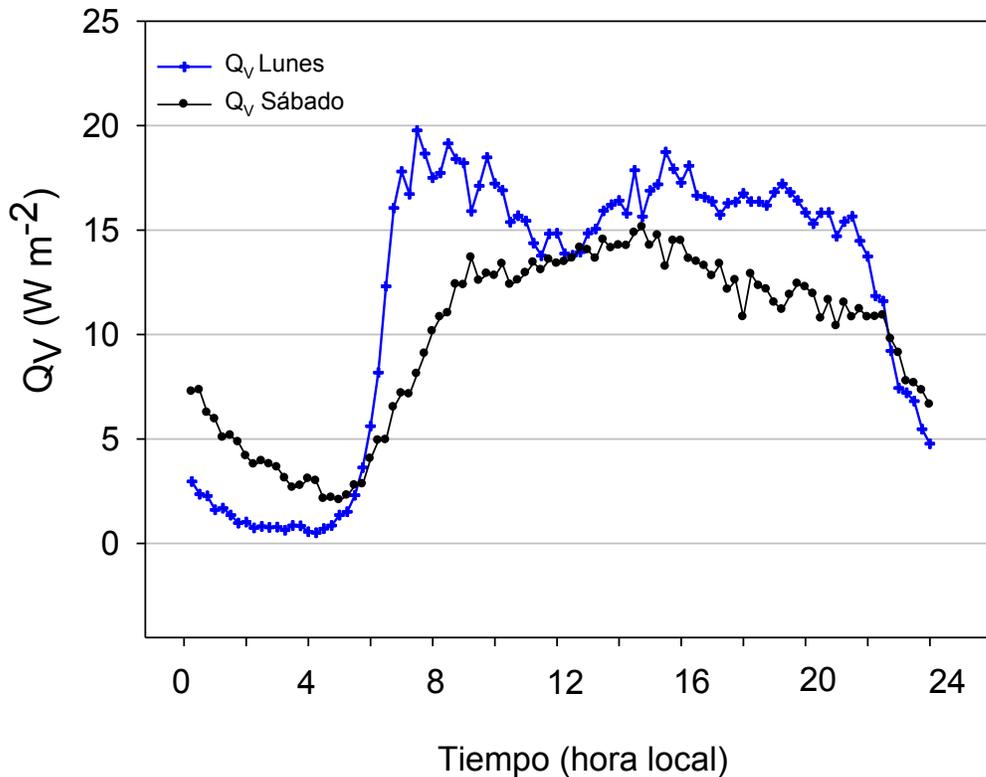


Figura 14. Flujo de calor antropogénico vehicular (Q_V), del día 6 y 11 de septiembre correspondiente al lunes y sábado del 2010.

6.3 Radiación neta y flujo de calor antropogénico vehicular

Bajo la suposición que Q_V se comporta igual durante todo el año (día de la semana laboral), es posible analizar la contribución de Q_V al flujo neto de energía, comparándola con el flujo de radiación neta (Q_N).

En la figura 14 se muestra el flujo de calor vehicular (día 6 de setiembre, 2010) y de la radiación neta (18 de marzo, 2006), y cuando Q_N registra valores más altos de 450 W m^{-2} (10:30 horas), Q_V presenta un valor alrededor de 16.0 W m^{-2} , que corresponde a un 3.6 % con respecto a Q_N . Hacia las 13:00 horas se registró el máximo de Q_N alrededor de 700 W m^{-2} y Q_V registró los 14 W m^{-2} , que coincide con la mínima actividad vehicular del día. En la tarde Q_N comienza a descender y Q_V vuelve a incrementarse que oscila entre los 15 y 18 W m^{-2} , manteniéndose así

desde las 15:00 hasta casi las 21:00 horas. A las 17:00 horas Q_V ya representa el 7 % de Q_N (225 W m^{-2}).

En este día de análisis de Q_N es de 449 W m^{-2} en promedio (para $Q_N > 0$), mientras que el promedio de Q_V fue de 17 W m^{-2} , siendo así Q_V el **3.8 %** de Q_N , que muy probablemente y estadísticamente hablando su contribución puede no ser significativa; sin embargo, meteorológicamente puede llegar hacerlo (además de que aún faltan por sumar los 2 componentes restantes de Q_V).

En un estudio, Sailor (2015) muestra que las principales ciudades de Estados Unidos de América de las que se calculó Q_F en el verano e invierno (las temporadas de mayor consumo energético antrópico), la ciudad de Nueva York, San Francisco, Washington y Boston, presentaron en promedio, un Q_F de 79, 45.6, 48 y 51 W m^{-2} , respectivamente. Mientras que en ciudades como Denver, Cincinnati y Detroit el Q_F promedio fue de 14, 16 y 21 W m^{-2} . Aunque, el Q_V obtenido en este trabajo no se puede comparar con el obtenido en las ciudades mencionadas anteriormente, por los diferentes tiempos de medición, nos da de forma general hacia dónde podría orientarse el Q_F en Ciudad de México, y que por ello requiere de una mayor atención dada las características orográficas, urbanas y climáticas de esta región.

Como ya se mencionó, Q_F puede llegar a ser un factor importante en el desarrollo de la ICU, ya que ésta puede contribuir al aumento de la temperatura del aire, que puede afectar en el índice de confort térmico humano, y que los habitantes experimenten un mayor estrés por calor, con lo que en los meses de marzo, abril y mayo (temporada seca, para la Ciudad de México), muy probablemente las personas consuman una mayor cantidad de energía para climatizar *in situ*.

Otro fenómeno de suma importancia en las áreas urbanas, son las ondas de calor, ya que estas tienden a aumentar el riesgo de una mayor morbilidad en la población urbana (IPPC, 2001). En la Ciudad de México, Jáuregui (2009) definió el fenómeno con valores superiores a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ observados durante tres días o más y una temperatura media diaria igual o superior a $24 \text{ }^\circ\text{C}$.

El día que se tomaron los videos fue un día de medio nublado a parcialmente nublado, con algunas lluvias aisladas (observación durante la clasificación vehicular). La estación meteorológica más cercana al sitio de estudio, es la del CCA (Pembu). La figura 15 muestra el comportamiento de la temperatura del aire (T_A) y Q_V el día 6 de septiembre del 2010, y aunque pareciera que el comportamiento es similar, no existe una relación directa de ambos; sin embargo, resulta interesante observar que en horas nocturnas (22:00 – 04:00 horas), la temperatura tiene aumentos esporádicos, cabe mencionar que T_A en un momento dado se da alrededor de dos horas después del Q_H actual (Ballinas y Barradas, 2016) cuando $Q_N > 0$. Como ya se mencionó, Q_F solo es un factor más que contribuye al efecto de la isla de calor en las áreas urbanas.

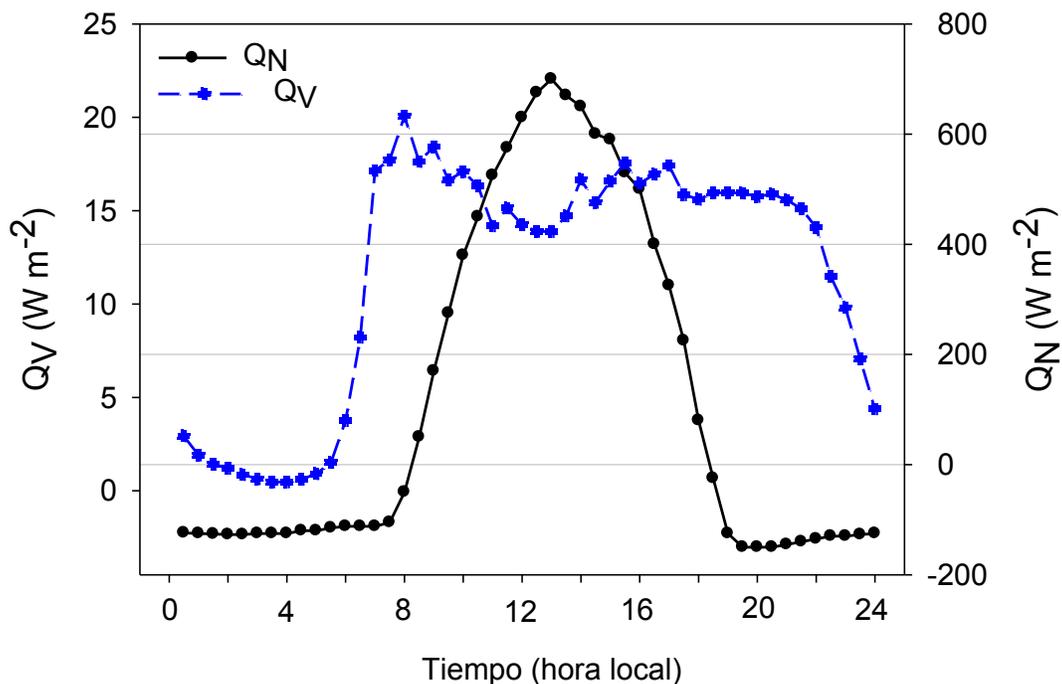


Figura 14. Flujo de calor antropogénico vehicular (Q_V) del sitio de estudio y radiación neta (Q_N), medidos en Escandón, marzo del 2006 (modificado de Ballinas y Barradas, 2016).

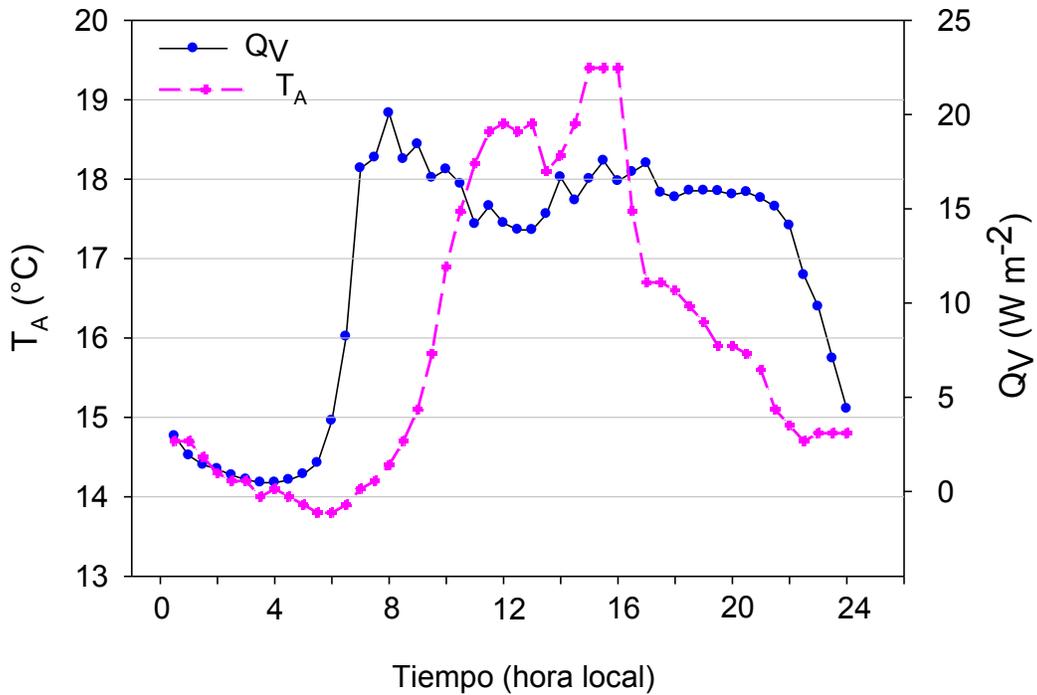


Figura 15. Flujo de calor antropogénico vehicular (Q_V) y temperatura del aire (T_A), el 6 de septiembre del 2010.

6.4 Determinación de Q_F modelo LUCY

La figura 16 muestra los principales estados con mayor emisión de calor, de acuerdo a la corrida del modelo LUCY para México. Se puede apreciar que la Ciudad de México tiene la mayor emisión de Q_F , seguido por las capitales de los estados de Jalisco y Nuevo León.

Algo que resalta la atención es el papel que juegan las ciudades fronterizas, como es el caso de Tamaulipas frontera con Texas y Ciudad Juárez, Chih., y El Paso, Texas, las cuales según el modelo se hacen notar.



Figura 16. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) de México, en septiembre.

Las zonas de mayor emisión en Ciudad de México, de acuerdo modelo se encuentran en el noreste de la ciudad, donde los resultados, para una resolución de $30'' \times 30''$, muestran que el promedio de emisión de Q_F el día 6 de septiembre, es de alrededor de $80 W m^{-2}$ (Fig. 17), mientras que para nuestra área de estudio, el promedio de emisión es de $14.76 W m^{-2}$ éste valor comparado con el valor promedio obtenido del Q_V ($17 W m^{-2}$) resulta menor, por lo que se deduce que el modelo muy probablemente este subestimando la verdadera emisión del Q_F en Ciudad de México.

Lo descrito anteriormente es comprensible debido a que la Ciudad de México no tiene un inventario de las emisiones de calor y mucho menos de sus principales fuentes, por lo que no se ha actualizado la base de datos con la cual opera el modelo en enlace global.

La figura 18 muestra el comportamiento diario del Q_F del área de estudio en comparación con un área de de mayor emisión de la Ciudad de México, donde claramente se observa una gran diferencia de consumo de energético traducido en emisión de calor. Donde según el modelo el Q_F de nuestro sitio de estudio

alcanza valores máximos superiores a los 20 W m^{-2} , mientras que la zona de mayor emisión alcanza valores por encima de los 100 W m^{-2} .

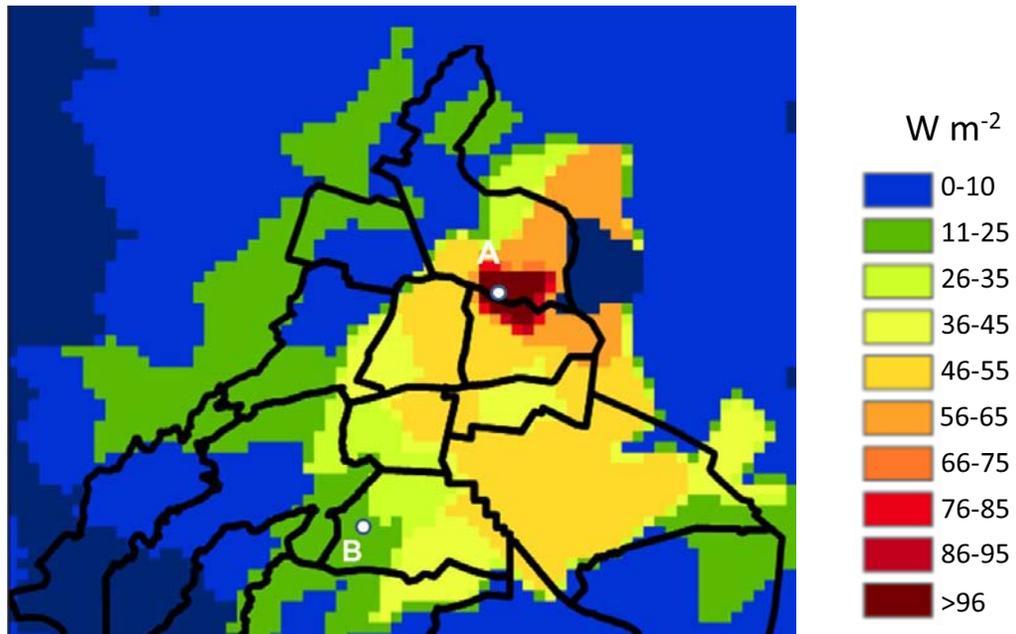


Figura 17. Energía antrópica (Q_F , W m^{-2}) a las 14:00 horas en la Ciudad de México, el punto A indica la zona de mayor emisión de Q_F y el punto B la ubicación de nuestra zona de estudio.

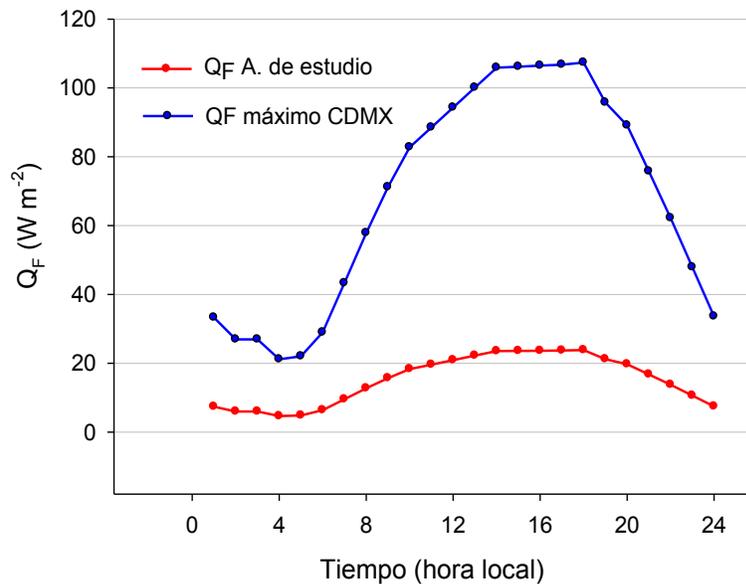


Figura 18. Energía antrópica (Q_F) del área de estudio y área de mayor emisión en la Ciudad de México (CDMX).

Los resultados del modelo para los 365 días del año, muestran que el Q_F en la Ciudad de México, tienen un valor promedio anual de alrededor de 31 W m^{-2} . De acuerdo a los resultados mencionados anteriormente sobre otras ciudades, la Ciudad de México puede compararse por ejemplo con Reykjavik, Iceland (Steinecke, 1999), Gyeonggi, South Korea (Lee, *et al* 2009), Cincinnati, US (Bach, 1970) y Osaka, Japon (Ojima y Moriyama, 1982) por mencionar algunas con una emisión de 35, 28, 26 y 26 Wm^{-2} , respectivamente, en concordancia con este modelo.

Para los resultados de Q_V del modelo, en comparación con el Q_V obtenido de nuestro estudio, resulta mucho menor, esto indudablemente puede ser debido a la resolución del modelo, ya que el área que maneja es de aproximadamente $857,476 \text{ m}^2$ mientras que la nuestra es de $15,582 \text{ m}^2$.

Algo importante que se puede notar en los resultados es que la falta de información detallada, hace que el modelo no vea el comportamiento real del parque vehicular durante las horas diurnas (Fig. 19).

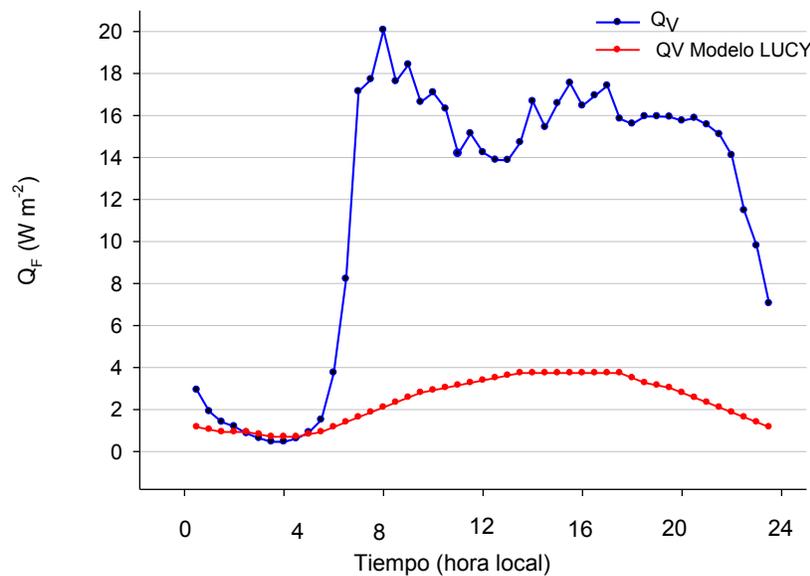


Figura 19. Comportamiento del flujo antrópico vehicular obtenido y flujo antrópico vehicular estimado el modelo LUCY (6 de septiembre 2010).

De acuerdo a los autores Allen (2011) y Lindberg (2013), los conteos de tránsito pueden resultar más fiables para estimar Q_V que el número total de automóviles de una ciudad, los cuales no indican cuántos realmente son impulsados cada día, los totales de tráfico diarios y horarios podrían ser utilizados para calibrar el conjunto de datos para las ciudades o países, y también para hacer más precisas las curvas entre semana y los fines de semana de las ciudades. Este tipo de datos se podría añadir en futuras versiones del modelo.

7. Conclusiones

Dentro de la clasificación vehicular los automóviles resultaron ser los mayores emisores de Q_V , principalmente debido a su gran cantidad. La emisión de calor de taxis y microbuses es casi similar, lo que indica que si hubiese un incremento de la flota de microbuses incrementaría su emisión, superando probablemente a la de los taxis.

Los resultados mostraron que la mayor emisión Q_V se da durante la mañana, superando los 20 W m^{-2} , no obstante, el pico que se da durante la tarde-noche es mucho más importante ya que aunque no supere los 20 W m^{-2} , su periodo de persistencia es mayor, y la oscilación va de los 16 a 18 W m^{-2} manteniéndose por más de 4 horas.

Los valores de máxima emisión de Q_V en fines de semana, son casi similares a los valores de menor emisión de los días laborales (10:00 a 13:00 horas), es decir la mayor actividad vehicular de fines de semana se iguala con la de menor actividad de los días labores.

Con respecto al balance de energía, el Q_V puede llegar a ser significativo en ciertas horas del día, especialmente en la tarde cuando Q_N tiene valores alrededor de 225 W m^{-2} y Q_V representa el 7 %. Muy probablemente sumando los términos restantes de Q_F será significativo durante más tiempo, especialmente durante la mañana y tarde, cuando Q_N empiece aumentar y a disminuir respectivamente.

En el modelo de balance de energía urbana que la energía disponible es $Q_N + Q_F$ y se tiene que después del máximo de Q_N , en las primeras horas de la tarde, la distribución de la energía es disipada principalmente por Q_S , ya que se ha demostrado que en un ambiente urbano más de la mitad de Q_N se almacena durante el día (Ching, 1985; Oke *et al.*, 1999; Tejeda y Jáuregui, 2004; Ballinas y Barradas, 2016). Por lo que muy probablemente Q_F también sea disipada de esta manera.

La liberación de energía de Q_F es considerada como un importante contribuyente a la isla de calor (Oke, 1987; Lee *et al.*, 2009; Papparelli *et al.*, 2011), también a la intensificación de ciertos fenómenos como las ondas de calor. Por lo que se espera que si el parque vehicular sigue incrementándose en Ciudad de México indudablemente la emisión de Q_V aumentará, favoreciendo a que estos fenómenos sean más frecuentes.

De acuerdo a los resultados Q_V tiene un ciclo diurno marcado, teniendo su mayor emisión durante la mañana y primeras horas de la noche, a pesar de que solo es un componente del modelo, éste mantuvo un valor promedio diario de 17 W m^{-2} (lunes-viernes), se esperaría que éste valor no varié significativamente a lo largo del año, debido a que el calor emitido depende de las actividades realizadas, actividades que son semejantes a lo largo del año.

El modelo de emisiones de calor (LUCY), contiene los principales elementos de flujo de calor antrópico, los autores y algunos investigadores mencionan que los resultados se pueden utilizar con grado de confianza (Offerle *et al.*, 2005; Pigeon *et al.*, 2007). Sin embargo, el modelo puede mejorar los resultados a través de inventarios, los cuales favorecerían para calibrar el conjunto de datos, haciendo más precisas las curvas entre semana y los fines de semana de las ciudades. Este tipo de datos se podría añadir en futuras versiones del modelo.

El Q_F estimado por LUCY en Ciudad de México, muestra que es necesario integrarlo en el balance de energía, ya que hay zonas donde éste puede llegar a superar los 100 W m^{-2} durante el día. Especialmente en las primeras horas de la noche.

Una de las limitantes del modelo fue no visualizar el comportamiento de Q_V en el ciclo diurno, debido principalmente a que la base de datos para nuestro país no cuenta con inventarios detallados, es decir las variaciones vehiculares con respecto a las actividades horarias de cada país.

Con los resultados obtenidos se espera idealizar las principales avenidas de Ciudad de México y obtener las principales fuentes de emisión. También se espera contribuir al modelo global LUCY, pero también generar nuestro propio modelo integrándolo con los componentes del balance de energía, para futuros estudios del clima urbano de Ciudad de México.

El modelo LUCY, mostró que es necesario integrar el componente de flujo de calor antrópico en el balance de energía, para futuros estudios del clima urbano.

También con los resultados es posible idealizar un auto estándar el cual permita estimar de manera más precisa el flujo de calor antrópico vehicular, en las diferentes vías de tránsito de la Ciudad de México, permitiendo obtener éste componente de forma más sencilla y rápida.

Por todos los problemas ambientales urbanos a los que nos enfrentamos, es necesario tener una mayor comprensión del comportamiento de Q_F en Ciudad de México, por lo que se requiere analizar los componentes restantes del modelo, en las temporadas de verano e invierno, las cuales marcan el mayor consumo de energía.

8. Bibliografía

Allen L., F. Lindberg y C.S.B. Grimmond. 2011. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International journal of climatology* 31:1990-2005.

Anne K.L., y M. Roth. 2012. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. *Atmospheric Environment* 46: 92-103.

Asimakopoulos, D.N., *et al.* 2001. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, James & James, London, UK.

Atkinson, B.W. 2003. Numerical modelling of urban heat-island intensity. *Bound-Layer Meteorol* 109: 285–310

Bach, W. 1970. An urban circulation model. *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology Series B* 18, 155-168

Ballinas, M. 2011. Mitigación de la isla de calor urbana a partir de la vegetación arbórea. Tesis de Maestría. Centro de Ciencias de la Atmósfera-Instituto de Ecología, UNAM, México, D.F.

Ballinas, M., y V.L. Barradas. 2016. The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *J. Environ. Qual.* doi:10.2134/jeq2015.01.0056.

Barradas V.L. 1987. Evidencia del efecto de "Isla Térmica" en Jalapa, Veracruz, México. *Geofísica* 26: 125-135 (IPGH, OEA).

Barradas V.L., y R. J-Seres. 1988. Los pulmones urbanos. *Ciencia y Desarrollo* 78:61-72.

Barradas V.L. 2013. La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *Oikos.* = 7

Bornstein, R.D. 1975. The two-dimensional URBMET urban boundary layer model. *J Appl. Meteorol.* 14:1459–1477.

Castillo, H.P., D.A. Mendoza y M.P. Caballero. 2011. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIII 2012: 293-306.

Cervantes T.A. 2009. Accidentes de tránsito. *Asunto de Estado y Salud Pública. Movilidad Amable* 6: 100-101

Cervantes-Pérez, J., M.A. Vargas-Sánchez y V.L. Barradas. 2001. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de México. *Ciudades*, 51: 19-24.

Christen, A., y R. Vogt. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology* 24: 1395-1421.

Crutzen, P.J. 2004. New Directions: The growing urban heat and pollution "island" effect – impact on chemistry and climate. *Atmos Environ* 38: 3539–3540.

Dandou, A., M. Tombrou, E. Akylas, N. Soulakellis y E. Bossioli. 2005. Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), *J. Geophys. Res.*, 110: D10102.

Department of Health, Education and Welfare, 1967. New Jersey Air Pollution Activity Technical Report. United States Department of Health, Education and Welfare, Washington D.C.

Eliasson, I. 1996. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmos Environ* 30: 379–392.

Emmanuel, M.R. 2005. *An Urban Approach to Climate-Sensitive Design; Strategies for the Tropics*, Spon Press, London, UK.

Fan, H., y D.J. Sailor. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmos. Environ.* 39: 73-84.

Flanner, M.G. 2009. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. *Geophys. Res. Lett.* 36:2. L02801.

García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM. ISBN 970-32-1010-4

Garza, G., y A. Damián. 1991. Ciudad de México etapas de crecimiento, infraestructura y equipamiento, Espacio y vivienda en la Ciudad de México, México, El Colegio de México, I Asamblea de Representantes del Distrito Federal, p. 23.

Grimmond, C.B.S. 1980. An evaporatranspiration-Interception model for urban areas. Chapter 4. Anthropogenic heat flux. Thesis doctor of philosophy. The University of British Columbia, November 1988.

Grimmond, C.B.S. 1980. The suburban energy balance: methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions. *International Journal of Climatology* 12: 481-497.

- Grimmond, C.S.B. 1992. The suburban energy balance: methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions. *International Journal of Climatology* 12: 481-497.
- Ichinose, T., K. Shimodozono y K. Hanaki. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33: 3897–3909.
- IPCC. 2001. *Climate change: impacts, adaptation and vulnerability*, WMO/UNEP, Cambridge, UK.
- Jáuregui, E. 1995. Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización: Revisión y perspectivas. *Invest. Geog* 31: 9-44.
- Jáuregui, E. 1997. Heat island development in Mexico city. *Atmospheric Environment* 31: 3821-3831
- Jáuregui, E. 2009. The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 70: 71-76.
- Jazcilevich, A.D., A.R. García y L.G. Ruíz. 2002. A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico. *Atmospheric Environment* 36: 2297–2307.
- Kalma, J.D., A.R. Aston y R.J. Millington. 1972. Energy use in the Sydney area. *Proceedings of the Ecological Society of Australia* 7: 125-142.
- Khan, S.M., y R.W. Simpson. 2001. Effect of heat island on the meteorology of a complex urban airshed. *Boundary-Layer Meteorology* 100: 487–506.
- Kim, Y.H., y J.J. Baik. 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *J Appl Meteorol* 41: 651–659
- Kimura, F., y S. Takahashi. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: a numerical experiment. *Atmospheric Environment* 25B: 155-164.
- Klysik, K. 1996. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Lodz, Poland. *Atmospheric Environment* 30: 3397-3404.
- Klysik, K., y K. Fortuniak. 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmos Environ* 33: 3885–3895
- Lee, S.H., C.K. Song, J.J. Baik y S.U. Park. 2009. Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region of Korea. *Theoretical and Applied Climatology* 96: 291–303.

- Makar, P. A., S. Gravel, V. Chirkov, K. B. Strawbridge, F. Froude, J. Arnold y J. Brook. 2006, Heat flux, urban properties, and regional weather, *Atmos. Environ.*, 40, 2750–2766.
- Offerle B., C.S.B. Grimmond y K. Fortuniak. 2005. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology* 25: 1405–1419.
- Offerle, B., P. Jonsson, I. Eliasson, y C.S.B. Grimmond. 2005. Urban modification of the surface energy balance in the West African Sahel: Ouagadougou, Burkina Faso. *Journal of Climate* 18: 3983-3995.
- Ojima, T., y M. Moriyama. 1982. Earth surface balance changes caused by urbanization. *Energy and Buildings* 4: 99-114.
- Oke, T.R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmos Environ* 7: 769–779.
- Oke, T.R., y B.B. Maxwell. 1975. Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmos Environ* 9: 191–200.
- Oke, T. R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108: 1–24.
- Oke, T.R. 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* 12: 471–508. Oke, T. R. 1987. *Boundary Layer Climates*, Methuen and Co., New York, NY, USA, 2nd edition.
- Papparelli, A., A. Kurbán y M. Cúnsulo. 2011. Isla de calor y ocupación espacial urbana en San Juan, Argentina: análisis evolutivo - Cuadernos de Vivienda y Urbanismo. 4, No. 7.
- Pigeon, G., D. Legain, P. Durand y V. Masson. 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology* 27: 1969-1981.
- Poumadere M., C. Mays, L.M. Sophie y R. Blong. 2005. The 2003 Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now. *Risk Analysis*. 25: 6.
- Prontuario. 2016. Prontuario de información geográfica delegacional de los Estados Unidos Mexicanos. Coyoacán, Distrito Federal. Clave geoestadística 09003. INEGI
- Rivas, R.V y I.B. Santin. 2006. Evaluación técnica sobre la incorporación de nuevos compuestos oxigenados en la preparación de gasolina comercial. Tesis de

- Maestría. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas
Departamento de Ingeniería Química Petrolera. IPN, México, D.F.
- Ryoo, S.B., y S.E. Moon. 1995. Detection of warming effects due to industrialization: an accumulated intervention model with an application in Pohang, Korea. *Journal of Applied Meteorology* 34: 1466–1471.
- Sailor, D.J., y L. Lu. 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment* 38: 2737-2748.
- Salamanca, F., M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustouli y M. Wang. 2014. Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119: 5949-5965.
- Seaman, N.L, F.L. Ludwig, E.G. Donall, T.T. Warner y C.M. Bhumralker. 1989. Numerical studies of urban planetary boundary-layer structure under realistic synoptic condition. *J Appl Meteorol* 28: 760–781
- Secretaría de Salud. 2008. Programa de Acción Específico 2007-2012 Seguridad Vial. México: Subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud.
- Shahmohamadi, P., A. I. Che-Ani, K. N. A.Maulud, N. M. Tawil, y A. G. Abdullah. 2011. The Impact of Anthropogenic Heat on Formation of Urban Heat Island and Energy Consumption Balance. *Urban Studies Research*. doi:10.1155/2011/497524.
- SMIC, 1971. Inadvertent Climate Modification: Report of the Study on Man's Impact on Climate. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Massachusetts.
- Steinecke, K. 1999. Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment* 33: 4157-4162.
- Tejeda, A., y O. E. Jáuregui. 2005. Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review. *Atmósfera* 18: 1-23.
- Velasco, E., S. Pressley, R. Grivicke, E. Allwine, T. Coons, W. Foster, B.T. Jobson, H. Westberg, R. Ramos, F. Hernández, L.T. Molina, y B. Lamb. 2009. Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* 9:7325–7342. doi:10.5194/acp-9-7325-2009
- Vukovich, F.M. 1971. Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex. *Mon Weather Rev* 99: 919–926.

WWF España. 2010. Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO2 del parque residencial existente en España en 2020, Pp 6. Http: www.wwf.es. Madrid, España.

Yoshikado, H. 1992. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. J Appl Meteorol 31: 1146– 1164

Páginas de internet

CIESIN. 2005. Columbia University, and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Gridded Population of the World Version 3 (GPWv3): Population Density Grids. Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw> (Consultado 25 de junio 2016)

CONAE, PyME y SENER. 2007. Eficiencia en calderas y combustión. El proceso de combustión. Dirección de Enlace y Programas Regionales, apoyo al sector privado. http://www.cnplm.org.sv/ucatee/ee/docs/Calderas_02.pdf (Consultado 17 de febrero 2016)

CTA. 2011. Center Transportation analysis. Biommas energy data book. Lower and higher heating values of gas, liquid and solid fuels. http://cta.ornl.gov/bedb/appendix_a.shtml (Consultado 18 de febrero 2016)

Eco-vehículos. 2016. Portal de indicadores de eficiencia energética y emisiones vehiculares. INECC, CONUEE y PROFECO. http://www.ecovehiculos.gob.mx/ecoetiquetado.php?vehiculo_id=7903 (Consultado 5 de febrero 2016)

El Financiero. 2014. <http://www.elfinanciero.com.mx/sociedad/restringen-circulacion-de-vehiculos-de-carga-en-vias-primarias-del-df.html> (Consultado 20 de noviembre 2015)

El Financiero. 2016. <http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/mueren-20-mil-personas-al-ano-por-contaminacion-del-aire-instituto-nacional-de-salud-publica.html> (Consultado 20 de junio 2016)

Encuesta. 2005. Encuesta de percepción en el consumo de gasolina. http://www.profeco.gob.mx/encuesta/histo_mirador.asp (Consultado 12 de febrero 2016)

Escobedo, F.M. 1992. El crecimiento urbano de la ciudad de México y su impacto ambiental. Revista de Administración Pública, No. 83. Sección de Previa. <http://biblio.juridicas.unam.mx/revistas/resulart.htm> (Consultado 10 de febrero 2016)

Excélsior. 2014. <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/07/16/971123> (Consultado 20 de noviembre 2015)

Excélsior. 2016. <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/04/23/1088374> (consultado 20 de junio 2016)

Galindo, L.M. 2009. La economía del cambio climático en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Secretaría de Hacienda y Crédito Público. http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/2009_semarnat_ecc_mex.pdf (Consultado 15 de febrero 2016)

Galindo, L.M. y H. Catalán. 2008. Estimación de los costos asociados a la instrumentación de medidas de control sobre mejora de eficiencia de combustible en autos nuevos y uso de biocombustible en el sector transporte en México. México: Instituto Nacional de Ecología-Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.inecc.gob.mx/descargas/calaire/2008_inf_emis_costos_bioetanol.pdf (Consultado 16 de febrero 2016)

GEO. 2016. Zonas urbanas, panorama mundial. Cap.2. <http://www.grid.unep.ch/geo/geo3/spanish/401.htm> (Consultado 22 de marzo 2016)

Geosalud. 2016. <http://www.geosalud.com/Ambiente/calorsalud.htm> (Consultado 25 de marzo 2016)

HDS. 2011. Hoja de datos de seguridad. Pemex Magna. PR-107/2010. <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDSS-107%20Pemex%20Magna.pdf> (Consultado 5 de noviembre 2015)

INE. 2011. Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). México: Instituto Nacional de Ecología – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2014_inf_parc_tipos_comb_fosiles.pdf (Consultado 3 de marzo 2016)

INEGI. 2016. http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=8 (Consultado 4 de abril 2016)

- INSP. 2016. <http://www.insp.mx/infografias/contaminacion-aire-salud.html>
(Consultado 16 de febrero 2016)
- International Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Assessment Report (AR) 4. Cambridge University Press. URL: <http://www.ipcc.ch> (Consultado 11 de marzo 2016)
- Lozano, A., V. Torres y J.P. Antún. 2003. Tráfico vehicular en zonas urbanas. Ciencias. 70. <http://www.revistaciencias.unam.mx/es/> (Consultado 14 de marzo 2016)
- Mediterráneo.2003. http://www.elperiodicomediterraneo.com/noticias/sociedad/ola-calor-deja-mas-11-000-muertos-francia_66157.html (Consultado 18 de marzo 2016)
- Patiño, R.H. 2006. Determinación del calor de combustión. Recopilación. <http://iqcelaya.itc.mx/~roosph/PracticasFQ/H.pdf> (Consultado 10 de noviembre 2015)
- SEDEMA. 2012. Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. Zona Metropolitana de México.
<http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110143/Inventario-emisioneszmvm2012.pdf> (Consultado 22 de junio 2016)
- SENER. 2011. Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos. Secretaría de Energía (SENER) en colaboración con la Agencia Internacional de Energía (AIE). British Embassy Mexico City. http://www.energia.gob.mx/taller/res/1858/iee_mexico.pdf (Consultado 16 de marzo 2016)
- SIMAT. 2014.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2014/#p=6 (Consultado 21 de junio 2016)
- UNS. 2016. Biblioteca de la Universidad Nacional del Santa, Perú. http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas_tema_3.pdf
(Consultado 14 de marzo 2016)

UPME. 2016. Relaciones astronómicas sol-tierra. Propagación de la radiación solar. Apéndice A. http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/7-Apendice_A.pdf (Consultado 5 de abril 2016)

Worldmapper.2006a. Transport maps.

http://www.worldmapper.org/textindex/text_transport.html

Worldmapper.2006b. Electricityproduction.

<http://www.worldmapper.org/display.php?selected=117>

9. ANEXOS

Anexo 1. Características del modelo LUCY

Descripción del modelo (micromet, 2016):

Paso 1

Número de día: Permite al usuario ejecutar cualquier día entre 1900 y 2100, sin embargo, el éxito de la ejecución depende altamente del conjunto de datos disponibles para el tiempo específico de interés.

Fracción de vehículos en carretera: Las estadísticas de tráfico se basan en el número total de vehículos, este factor permite que fracción de los vehículos son los que en realidad están en operación.

Selección de la velocidad media del vehículo

Paso 2

Selección del sitio de estudio: En esta sección se puede seleccionar por tres formas; buscando la ciudad en la opción select country, a través de un mapa en la sección select region on world map y escribiendo las coordenadas.

Paso 3

Elegir los datos de población de entrada, en esta parte hay dos conjuntos de datos de densidad para elegir.

- GRUMP: Cuadrícula rural-urbana, proyección mapa
- GPW: Cuadrícula población del mundo. Este conjunto de datos se cuadrícula en el 2.5' x 2.5'.

Elección de la resolución: Al escoger GRUMP, es posible cambiar la resolución espacial en LUCY. La resolución de los pixeles disponibles es de 30",60",2.5',5',10',20' y 0.5°. Si se escoge GPW la resolución espacial se fija a 2.5'.

Paso 4 y 5

Es seleccionar la carpeta donde se desea que guarde los archivos generados por el modelo, también si se quiere que muestre los mapas horarios durante la ejecución del programa.

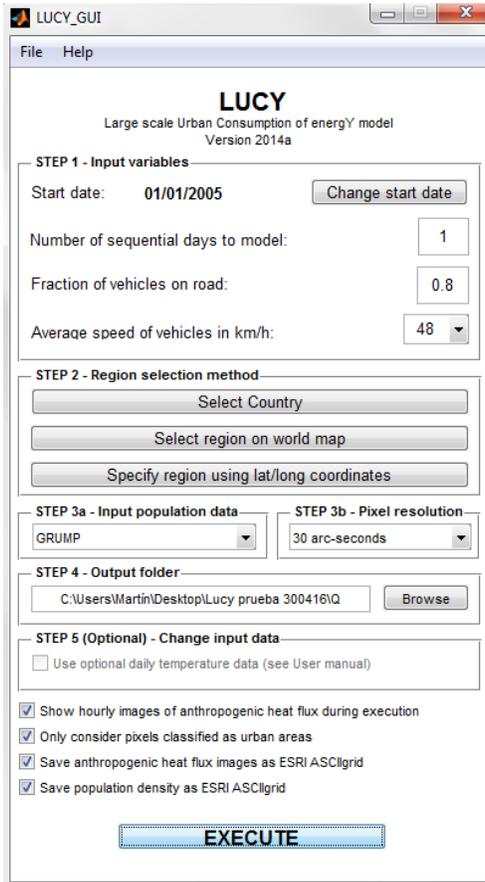


Figura A1. Interface del modelo LUCY.

Tabla A1. Datos utilizados por el modelo LUCY (Allen *et al.*, 2011)

Datos utilizados en el modelo LUCY			
Fente de calor	Entrada	Referencia	Unidad espacial/administrativa
Calor metabólico	Densidad de población	CIESIN (2005a, 2005b)	Global 2.5 arc-minute grid
	Horario normal de trabajo	Lonely Planet (2009)	American Samoa, Azerbaijan, Bhutan, Bosnia-Herzegovina, Cyprus, East Timor, Ecuador, Equatorial Guinea, Grenada, Guam, US Virgin Islands.
		Frommer's (2009)	Egypt
		CAC Biodiversity (2003)	Kazakhstan
		Ile Mayotte (2007)	Mayotte
	UNHCR (2006)	North Korea	
	Saint Pierre et Miquelon Info (2009)	St Pierre and Miquelon	
	World Travel Guide 2009	Todos los demás países y territorios	
Calor vehicular	Densidad y tipos de vehículos	Worldmapper (2006a),	Todos los países y territorios
	Festivos fijos	World Travel Guide (2009), Q++Studio (2009)	Todos los demás países y territorios Mayotte, San Pedro y Miquelón
		Bank Holidays of the World (2009), Lonely Planet (2009), World Travel Guide (2009)	Todos los países y territorios
	Patrón diario de vehículos	Hallenbeck <i>et al.</i> (1997:25)	Todos los países y territorios
	Emisiones de calor del vehículo	Smith <i>et al.</i> (2009: 27)	Todos los países y territorios
Calor edificaciones	Consumo de energía primaria	EIA (2009)	Todos los países y territorios a excepción de Anguilla, Jersey, Mayotte, Northern Mariana Islands Guernsey Andorra, Liechtenstein, West Bank y Gaza Strip
	Consumo de electricidad	Consumo de electricidad	" "
	Producción de electricidad	States of Guernsey (2008), Worldmapper (2006b)	" "
	Datos de temperatura	Willmott <i>et al.</i> 1998	Global 0.5°x0.5° grid

Anexo 2. Q_F estimado por el modelo en Ciudad de México, en los diferentes meses.

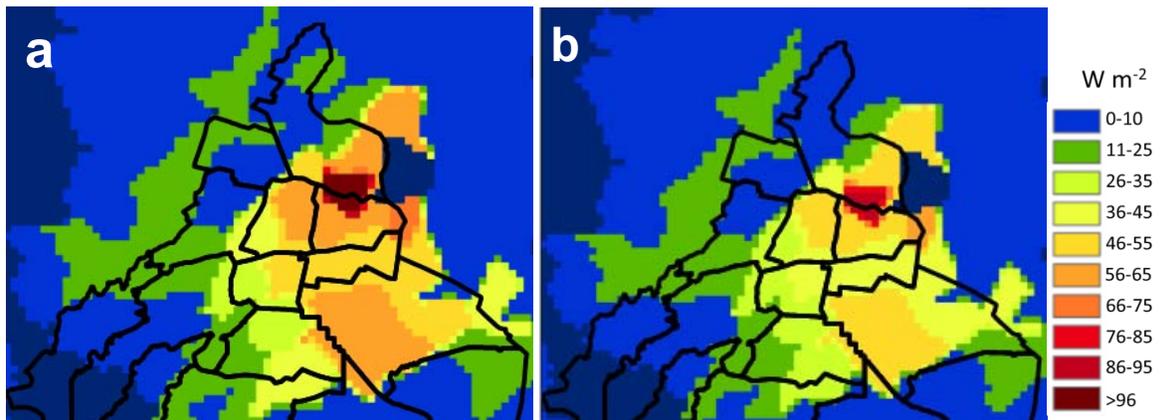


Figura A1. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de enero.

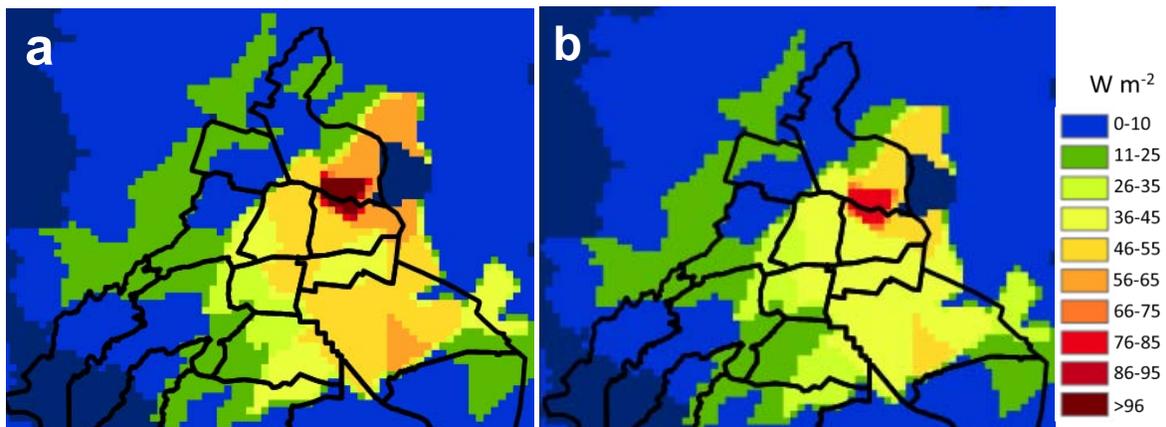


Figura A2. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de febrero.

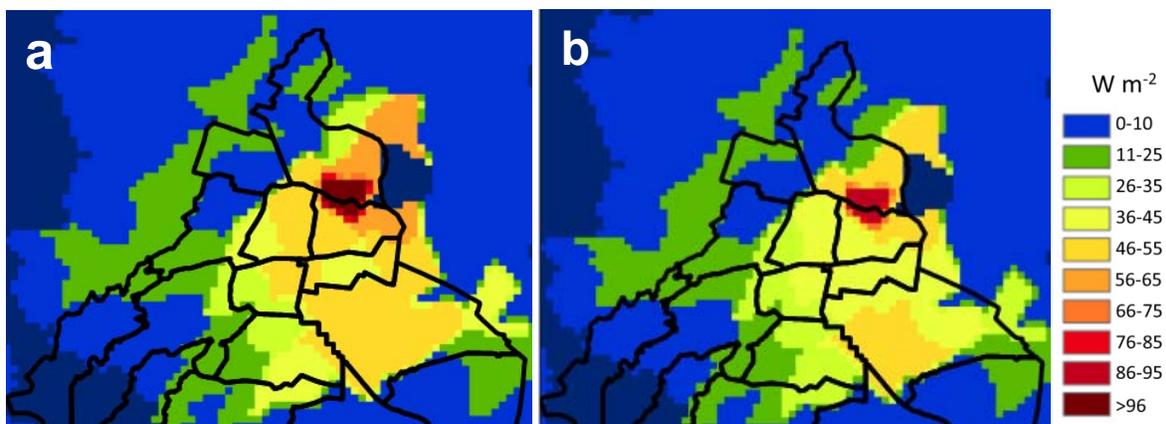


Figura A3. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de marzo.

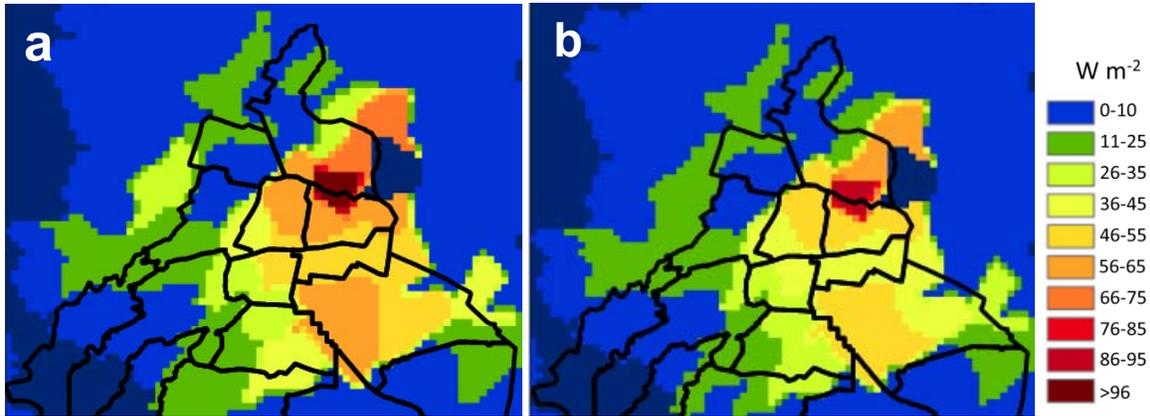


Figura A4. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de abril.

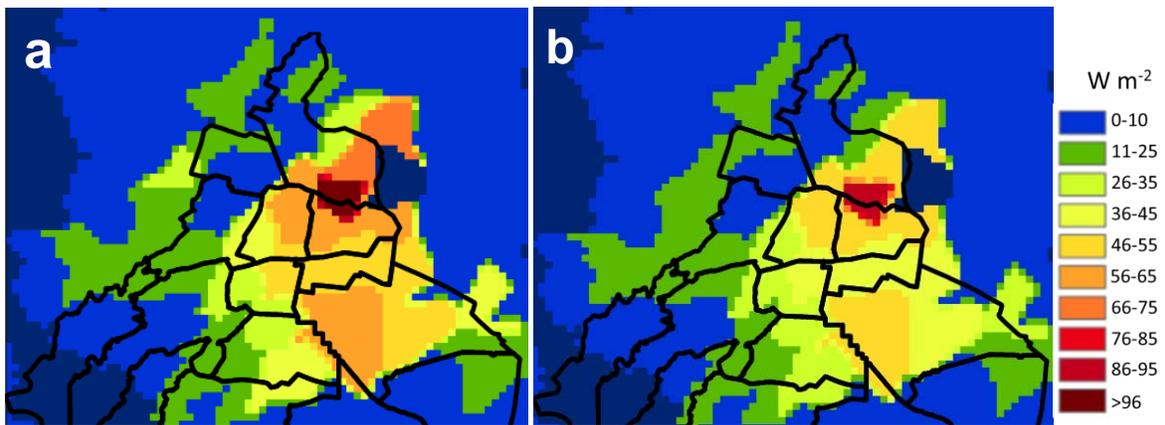


Figura A5. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de mayo.

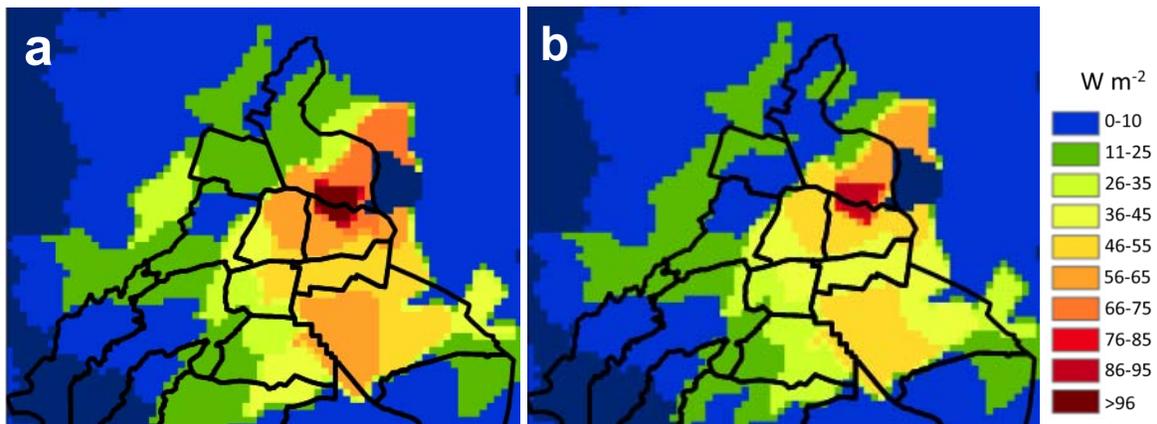


Figura A6. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de junio.

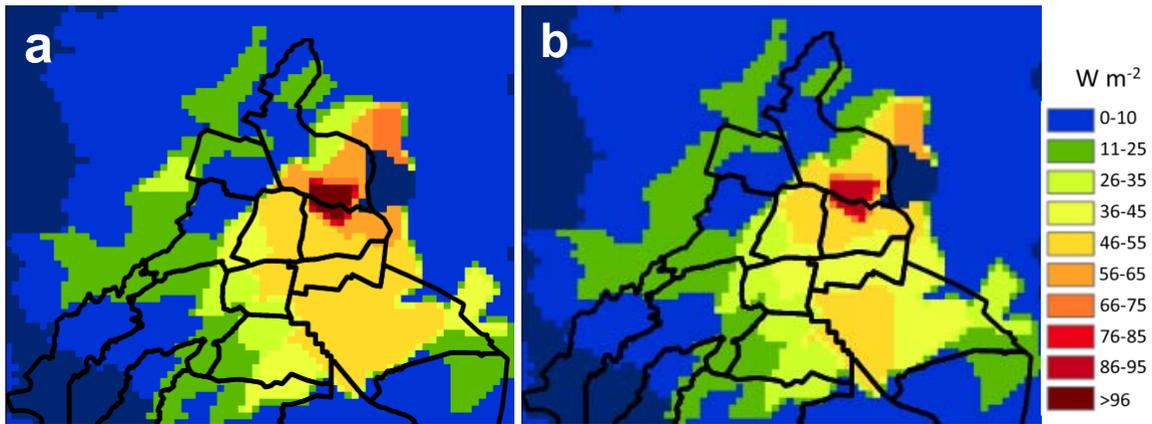


Figura A7. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de julio.

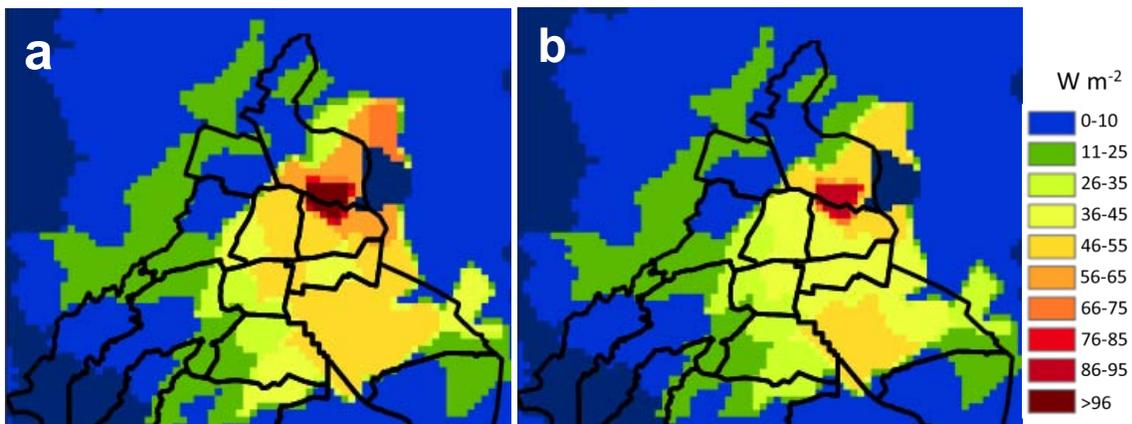


Figura A8. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de agosto.

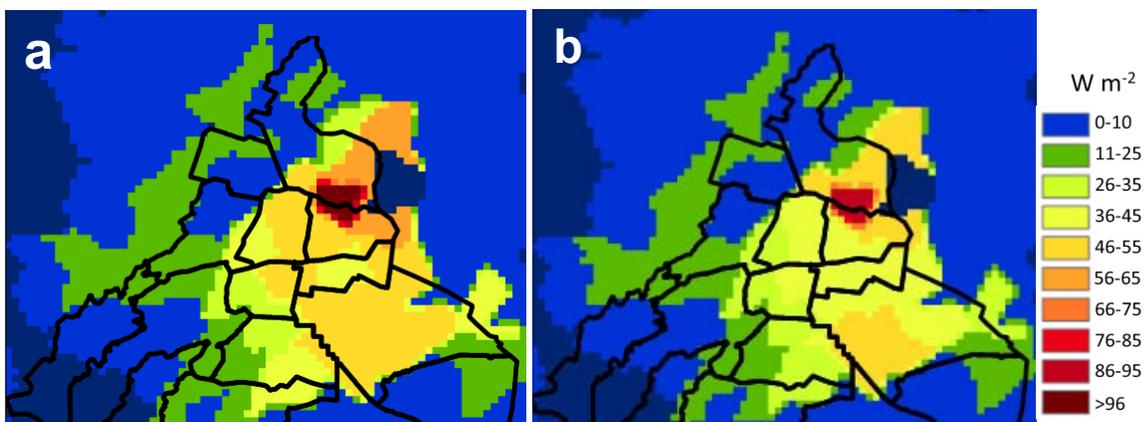


Figura A10. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de septiembre.

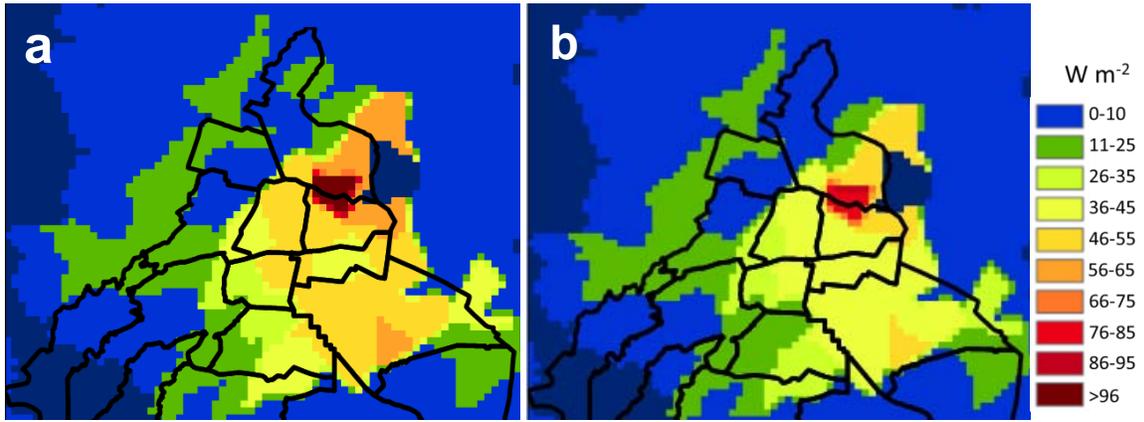


Figura A11. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de octubre.

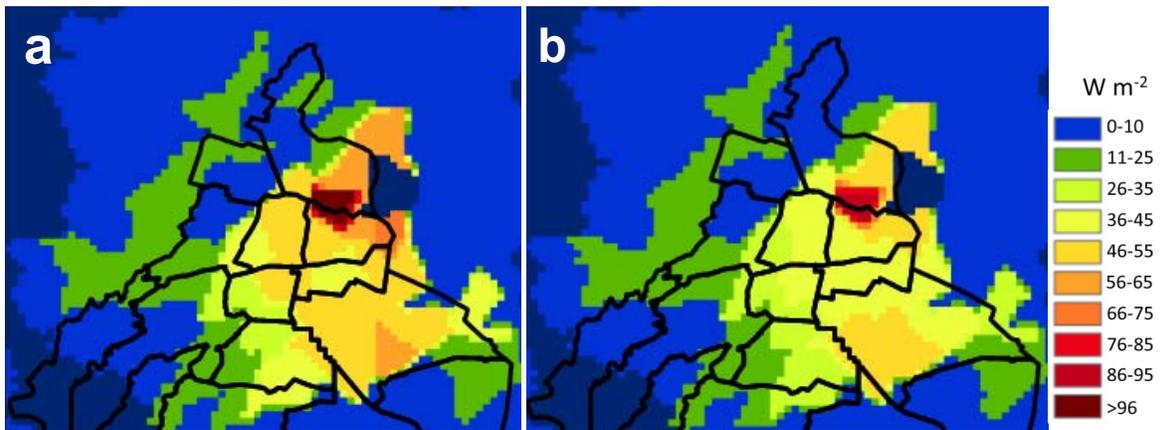


Figura A12. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de noviembre.

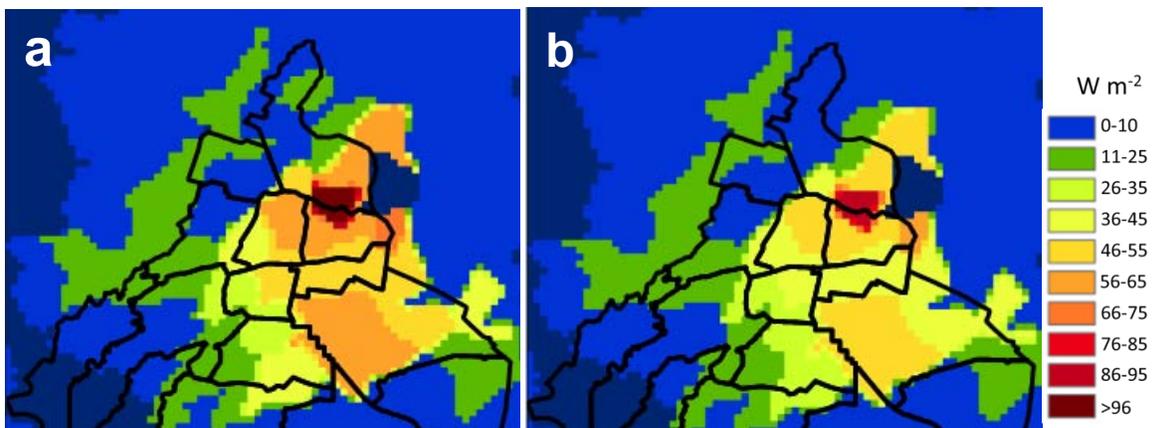


Figura A13. Energía antrópica (Q_F , $W m^{-2}$) a las 14:00 (figura a) y 19 horas (figura b) en la Ciudad de México, del mes de diciembre.

Anexo 3. Algunos resultados requeridos para el cálculo de Q_v en el sitio de estudio.

Tabla A1. Energía utilizada por la clase de vehículo y tipo de combustible ($J m^{-1}$). El porcentaje hace referencia a la cantidad de automóviles que consumen el tipo de combustible.

Taxis Magna 100%	Automóviles Premium 20 %	Automóviles Magna 80%	Moto Magna 100%	Camionetas (4 y 6 CIL) Premium 20%	Camionetas (4 y 6 CIL) Magna 80%	Camionetas (8 CIL)
2398.153846	2413.269231	2398.153846	663.3191489	3149.849398	3130.120482	4447.36091
Microbús diesel 91.7%	Microbús gas L.P 6.1%	Microbús gasolina 2.2 %	Autobús diesel 91.7%	Autobús gas L.P 6.1%	Autobús gasolina 2.2%	
15819.95798	10414.28571	13099.15966	21272.0339	14003.38983	17613.55932	

Tabla A2. Número de vehículos que consume el tipo de combustible, aplicando el porcentaje obtenido de la encuesta SENER (2011) y PROFECO (2005). Segmento dirección oriente (6 de septiembre 2010).

Fecha	Tiempo	Taxis	Automóviles		Moto-	Camionetas 4		Camionetas 8 CIL (Magna)	Microbús			Autobús		
		(Magna)	(Premium)	(Magna)	cicletas (Magna)	(Premium)	(Magna)		(diesel)	(gas L.P)	(magna)	(Diesel)	(Gas L.P)	(magna)
09/06/2010	07:00:00	87	43.4	173.6	2	17	68	4	6.37	0.427	0.154	5.46	0.366	0.132
09/06/2010	08:45:00	81	40.2	160.8	2	14.2	56.8	3	6.37	0.427	0.154	4.55	0.305	0.11
09/06/2010	11:45:00	78	39.6	158.4	2	13.6	54.4	1	4.55	0.305	0.11	4.55	0.305	0.11
09/06/2010	14:45:00	111	59.8	239.2	3	15.8	63.2	2	7.28	0.488	0.176	6.37	0.427	0.154
09/06/2010	18:15:00	112	62	248	1	16.4	65.6	1	7.28	0.488	0.176	5.46	0.366	0.132
09/06/2010	19:15:00	116	65.8	263.2	3	17.8	71.2	3	6.37	0.427	0.154	5.46	0.366	0.132

Tabla A3. Número de vehículos que consume el tipo de combustible, aplicando el porcentaje obtenido de la encuesta SENER (2011) y PROFECO (2005). Segmento dirección poniente (6 de septiembre 2010).

Fecha	Tiempo	Taxis	Automóviles		Moto	Camionetas 4 y 6 CIL		Camionetas 8 CIL (Magna)	Microbús			Autobús		
		(Magna)	Premium	(Magna)	(Magna)	(Premium)	(Magna)	(Magna)	(diesel)	(gas L.P)	(magna)	(Diesel)	(Gas L.P)	(magna)
09/06/2010	07:15:00	135	91	364	1	19.8	79.2	5	8.253	0.549	0.198	7.336	0.488	0.176
09/06/2010	09:00:00	119	79.6	318.4	1	17.4	69.6	3	5.502	0.366	0.132	4.585	0.305	0.11
09/06/2010	12:30:00	91	52	208	1	16.4	65.6	2	5.502	0.366	0.132	5.502	0.366	0.132
09/06/2010	14:15:00	113	67.6	270.4		16.2	64.8	2	6.419	0.427	0.154	6.419	0.427	0.154
09/06/2010	18:00:00	96	53	212		16.8	67.2	3	5.502	0.366	0.132	5.502	0.366	0.132
09/06/2010	18:45:00	92	48.4	193.6		14.6	58.4	1	4.585	0.305	0.11	3.668	0.244	0.088
09/06/2010	19:30:00	78	39.4	157.6	2	14	56	2	3.668	0.244	0.088	5.502	0.366	0.132

Tabla A4. Q_v por clase de vehículo y tipo de combustible. Dirección oriente (6 de septiembre 2010).

Fecha	Tiempo	Taxis	Automóviles		Moto	Camionetas 4 y 6 CIL		Camionetas 8 CIL	Microbús		Autobús			Calor Antropogénico	
		Magna	Premium	Magna	Magna	Premium	Magna	Magna	Diesel	Gas L.P	Magna	Diesel	Gas L.P	Magna	TOTAL
09/06/2010	07:00:00	0.9119	0.4578	1.8197	0.0058	0.2341	0.9303	0.0778	0.4405	0.0194	0.0088	0.5077	0.0224	0.0102	5.4463
09/06/2010	08:45:00	0.8491	0.4240	1.6161	0.0058	0.1955	0.7771	0.0583	0.4405	0.0194	0.0088	0.4231	0.0187	0.0085	4.8448
09/06/2010	11:45:00	0.8176	0.4177	1.5920	0.0058	0.1872	0.7443	0.0194	0.3146	0.0139	0.0063	0.4231	0.0187	0.0085	4.5690
09/06/2010	14:45:00	1.1635	0.6308	2.4040	0.0087	0.2175	0.8647	0.0389	0.5034	0.0222	0.0101	0.5923	0.0261	0.0119	6.4940
09/06/2010	18:15:00	1.1740	0.6540	2.4925	0.0029	0.2258	0.8975	0.0194	0.5034	0.0222	0.0101	0.5077	0.0224	0.0102	6.5420
09/06/2010	19:15:00	1.2159	0.6941	2.6452	0.0087	0.2451	0.9741	0.0583	0.4405	0.0194	0.0088	0.5077	0.0224	0.0102	6.8504

Tabla A5. Q_v por clase de vehículo y tipo de combustible. Dirección poniente (6 de septiembre 2010).

Fecha	Tiempo	Automóviles		Moto	Camionetas 4 y 6 CIL		Camionetas 8 CIL		Microbús		Autobús			Calor Antropogénico	
		Magna	Premium		Magna	Magna	Premium	Magna	Magna	Diesel	Gas L.P	Magna	Diesel	Gas L.P	Magna
09/06/2010	07:15:00	1.4151	1.2644	3.6583	0.0028	0.2614	1.0455	0.0932	0.5472	0.0240	0.0109	0.6540	0.0286	0.0130	9.0182
09/06/2010	09:00:00	1.2474	1.1060	4.3961	0.0028	0.2297	0.9188	0.0559	0.3648	0.0160	0.0072	0.4087	0.0179	0.0081	8.7794
09/06/2010	12:30:00	0.9539	0.7225	2.8719	0.0028	0.2165	0.8660	0.0373	0.3648	0.0160	0.0072	0.4905	0.0215	0.0097	6.5804
09/06/2010	14:15:00	1.1845	0.9392	3.7334	0.0000	0.2138	0.8554	0.0373	0.4256	0.0186	0.0085	0.5722	0.0251	0.0114	8.0250
09/06/2010	18:00:00	1.0063	0.7364	2.9271	0.0000	0.2218	0.8871	0.0559	0.3648	0.0160	0.0072	0.4905	0.0215	0.0097	6.7442
09/06/2010	18:45:00	0.9644	0.6725	2.6730	0.0000	0.1927	0.7709	0.0186	0.3040	0.0133	0.0060	0.3270	0.0143	0.0065	5.9633
09/06/2010	19:30:00	0.8176	0.5474	2.1760	0.0056	0.1848	0.7392	0.0373	0.2432	0.0106	0.0048	0.4905	0.0215	0.0097	5.2883