



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA- ENERGÍA

**PERFIL HORARIO DE LA CONTRIBUCIÓN ANTROPOGÉNICA AL BALANCE
ENERGÉTICO SUPERFICIAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GLORIA VICTORIA SALAS CISNEROS

TUTOR
DRA. CLAUDIA SHEINBAUM PARDO
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Luis Gerardo Ruiz Suarez
Secretario: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo
Vocal: Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez
1^{er.} Suplente: Dra. Alejandra Castro González
2^{do.} Suplente: Dra. Esther Segura Pérez

México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

DRA. CLAUDIA SHEINBAUM PARDO
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

FIRMA

DEDICATORIA

A Julio, mi esposo, con el que me reencontré durante la maestría y testigo de mi devenir para la realización de este trabajo, gracias por ser mi compañero de vida.

A mis padres, Beatriz y Miguel, que aunque partieron no hace mucho tiempo están presentes en mi corazón acompañandome en todo momento, gracias por su amor y por inculcarme los valores que ahora son el eje de mi vida.

A mi hermano, Miguel, gracias por ser y estar a mi lado en todo momento, en especial en los momentos difíciles para ambos.

A mi amiga, Esther, gracias por tu apoyo en todo momento y en especial para retomar mis metas profesionales.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme brindado su apoyo a través de la beca durante los estudios de maestría.

A mi tutora, la Dra. Claudia Sheinbaum, gracias por la paciencia y por los momentos para dilucidar este trabajo.

A los sinodales de este trabajo, a la Dra. Cecilia Conde, al Dr. Luis Gerardo Ruiz, a la Dra. Alejandra Castro y la Dra. Esther Segura, gracias por sus valiosas recomendaciones que permitieron un claro fortalecimiento del mismo.

Especialmente al Dr. Ernesto Jáuregui y al Dr. Adalberto Tejeda, que amablemente revisaron los borradores iniciales y contribuyeron con valiosas observaciones que orientaron este trabajo.

Y finalmente, a todos los que han sido mis maestros en las aulas y fuera de ellas, ya que han sido una inspiración para construir mis ideales.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE TABLAS | 7 |
| LISTA DE FIGURAS | 9 |
| COMPUESTOS..... | 12 |
| UNIDADES Y PREFIJOS MÉTRICOS..... | 12 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 1.1. Propósito del trabajo | 13 |
| 1.1.1. <i>Objetivos</i> | 15 |
| 1.1.2. <i>Relevancia</i> | 15 |
| 1.1.3. <i>Organización</i> | 16 |
| 2. ANTECEDENTES | 18 |
| 2.1. El Sistema Climático | 20 |
| 2.2. Balance superficial energético..... | 23 |
| 2.2.1. <i>Balance superficial energético considerando la contribución antropogénica de calor</i> 28 | |
| 2.2.2. <i>Balance energético en zonas rurales</i> | 30 |
| 2.2.3. <i>Balance energético en zonas urbanas</i> | 31 |
| 2.2.4. <i>Balance energético de la capa superficial urbana</i> | 32 |
| 2.3. Efectos climáticos globales y locales intensificados por la contribución energética de origen antropogénico..... | 33 |
| 2.3.1. <i>Cambio climático local y global</i> | 33 |
| 2.3.2. <i>Isla de calor urbana y rural</i> | 36 |
| 2.3.3. <i>Estudio del fenómeno de isla de calor urbana en la Ciudad de México</i> | 42 |
| 3. EVALUACIÓN DEL CALOR ANTROPOGÉNICO EN ZONAS URBANAS.... | 46 |
| 3.1. Descripción de las fuentes antropogénicas de calor en zonas urbanas..... | 47 |
| 3.1.1. <i>Procesos de combustión</i> | 48 |
| 3.1.2. <i>Consumo de energía eléctrica</i> | 50 |
| 3.1.3. <i>Procesos metabólicos</i> | 50 |
| 3.2. Metodologías Top-Down para la generación del perfil de la contribución energética antropogénica | 52 |
| 3.2.1. <i>Método de inventario: estudio previos</i> | 52 |
| 3.3. Metodologías Bottom-Up para el perfil de la contribución energética antropogénica 56 | |
| 3.3.1. <i>Balance energético residual</i> | 56 |
| 3.3.2. <i>Metodología de modelación del comportamiento térmico del sector de la edificación</i> | 60 |
| 3.3.3. <i>Modelación de los diferentes sectores</i> | 62 |
| 3.1. Estimación de la contribución antropogénica energética mediante metodologías Bottom-Up y Top-Down | 62 |

| | |
|---|------------|
| 4. PLANTEAMIENTO | 67 |
| 4.1. Características geográficas de la Ciudad de México, región de estudio..... | 67 |
| 4.2. Modelación de las fuentes antropogénicas generadoras de calor | 70 |
| 4.2.1. <i>Perfil horario de los procesos de combustión por fuentes antropogénicas.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Subproductos de los procesos de combustión.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).....</i> | <i>73</i> |
| 4.2.1. <i>Perfil horario de las emisiones de calor por consumo de energía eléctrica.....</i> | <i>82</i> |
| 4.2.1. <i>Perfil horario de las emisiones de calor por el metabolismo humano.....</i> | <i>85</i> |
| 4.3. Planteamiento del modelo..... | 88 |
| 4.3.1. <i>Componente vehicular de calor (QFV).....</i> | <i>88</i> |
| 4.3.2. <i>Componente de calor por fuentes estacionarias (QFS).....</i> | <i>91</i> |
| 4.3.3. <i>Componente de calor del metabolismo humano (QFM).....</i> | <i>92</i> |
| 4.4. Procedimiento de validación del modelo | 93 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 95 |
| 5.1. <i>Estimación de la incertidumbre</i> | <i>102</i> |
| 5.2. Validación del modelo..... | 106 |
| 5.3. Mitigación del calor de origen antropogénico..... | 107 |
| 5.4. Ejemplos de estrategias de mitigación de los efectos del fenómeno de la Isla de Calor Urbana | 115 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 117 |
| <i>Posibles mejoras para la estimación de QF</i> | <i>118</i> |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 120 |
| ANEXO | 125 |
| I. Modelación de emisiones de fuentes móviles..... | 125 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| TABLA 2-1 GENERACIÓN DE CALOR SENSIBLE Y CALOR LATENTE | 29 |
| TABLA 2-2 CALOR DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO Y RADIACIÓN NETA (CONSIDERA TODAS LAS LONGITUDES DE ONDA) | 34 |
| TABLA 2-3 POSIBLES CAUSAS DE LA ISLA DE CALOR URBANA (NO POR ORDEN DE IMPORTANCIA) | 41 |
| TABLA 3-1 TASAS DE CALOR METABÓLICO EXCEDENTE DE ACUERDO AL NIVEL DE ACTIVIDAD | 51 |
| TABLA 3-2 ECUACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS SUBCOMPONENTES DEL FLUJO DE CALOR ANTROPOGÉNICO | 64 |
| TABLA 3-3 ECUACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DEL FLUJO DE CALOR ANTROPOGÉNICO | 65 |
| TABLA 4-1 USO DE SUELO DE LA ZMVM, 2010 | 69 |
| TABLA 4-2 EMISIONES PROMEDIO HORARIAS DE LA ZMVM, 2010 | 72 |
| TABLA 4-3 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVM, 2010 | 73 |
| TABLA 4-4 CONTRIBUCIÓN POR FUENTE AL INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVM, 2010 | 74 |
| TABLA 4-5 PARQUE VEHICULAR POR AÑO MODELO DE LA ZMVM, 2010 | 79 |
| TABLA 4-6 RECORRIDO ANUAL DE LOS VEHÍCULOS DE LA ZMVM, 2010 | 80 |
| TABLA 4-7 CONTRIBUCIÓN POR FUENTE AL INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVM, 2010 | 83 |
| TABLA 4-8 ÁREA DE CONTROL CENTRAL DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL | 85 |
| TABLA 4-9 PERIODOS DE ACTIVIDAD HUMANA | 86 |
| TABLA 4-10 HABITANTES DE LA CIUDAD DE MÉXICO EN 2010 | 87 |
| TABLA 4-11 CONSUMO ENERGÉTICO SECTORIAL EN LA ZMVM, 2010 | 89 |
| TABLA 4-12 EFICIENCIA ENERGÉTICA POR TIPO DE VEHÍCULO Y AÑO MODELO DE LA FLOTA VEHICULAR DE LA ZMVM, 2010 | 90 |
| TABLA 4-13 DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LA DEMANDA ELÉCTRICA ANUAL DEL ÁREA CENTRAL DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL, 2010 | 92 |
| TABLA 5-1 CONSUMO ENERGÉTICO POR FUENTE (PJ) | 96 |
| TABLA 5-2 CONSUMO ENERGÉTICO POR FUENTE (MW) | 97 |
| TABLA 5-3 CONTRIBUCIÓN ANTROPOGÉNICA HORARIA AL BALANCE SUPERFICIAL ENERGÉTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO EN 2010 POR FUENTE Y COMBUSTIBLES (WM ²) | 98 |
| TABLA 5-4 GRADO DE INCERTIDUMBRE ASOCIADA A LOS DATOS DE ACTIVIDAD DE LAS FUENTES DE COMBUSTIÓN | 103 |
| TABLA 5-5 INCERTIDUMBRE ASOCIADA A LAS VARIABLES DE LA ECUACIÓN 4-11 | 104 |
| TABLA 5-6 INCERTIDUMBRE PORCENTUAL ASOCIADA A LA ECUACIÓN 4-11 | 105 |
| TABLA 5-7 INCERTIDUMBRE PORCENTUAL PROMEDIO ASOCIADA A LAS SUBCOMPONENTES DE CALOR ANTROPOGÉNICO | 106 |
| TABLA 5-8 CONSUMO ENERGÉTICO Y DISTRIBUCIÓN SECTORIAL EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y A NIVEL NACIONAL, 2010 | 108 |
| TABLA 5-9 CONSUMO ENERGÉTICO Y DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL SECTORIAL EN ALEMANIA Y ESTADOS UNIDOS, 2010 | 109 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 5-10 ACTIVIDAD VEHICULAR EN DISTINTAS ZONAS METROPOLITANAS (KILÓMETROS RECORRIDOS POR VEHÍCULO), 2010 | 110 |
| TABLA 5-11 ACTIVIDAD VEHICULAR EN DISTINTAS ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO, KILÓMETROS RECORRIDOS (KVR) TOTALES Y TASA DE CRECIMIENTO MEDIA ANUAL (TCMA), 1990-2009..... | 111 |
| TABLA I-1 EMISIONES DE CO POR TIPO DE VEHÍCULO EN LA ZMVM, 2010 | 127 |
| TABLA I-2 PODER CALORÍFICO DEL COMBUSTIBLE PARA VEHÍCULOS, 2010..... | 127 |
| TABLA I-3 FACTORES DE EMISIÓN DE CO AÑO MODELO A GASOLINA PARA LA ZMVM, 2010 | 128 |
| TABLA I-4 FACTORES DE EMISIÓN DE CO AÑO MODELO A DIÉSEL PARA LA ZMVM, 2010 | 129 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1-1 UBICACIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO CON RESPECTO AL TRÓPICO DE CÁNCER | 14 |
| FIGURA 2-1 ESQUEMATIZACIÓN DE LA CAPA ATMOSFÉRICA SUPERFICIAL | 21 |
| FIGURA 2-2 ESQUEMATIZACIÓN DEL BALANCE RADIATIVO SUPERFICIAL EN EL DÍA Y EN LA NOCHE | 26 |
| FIGURA 2-3 EL BALANCE DE ENERGÍA PARA UNA SUPERFICIE DE DÍA Y DE NOCHE | 27 |
| FIGURA 2-4 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA E INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR ENTRE UNA ZONA URBANA Y UNA RURAL..... | 32 |
| FIGURA 2-5 NIVELES DE EMISIONES GLOBALES CONSISTENTES CON UN INCREMENTO T DE LA TEMPERATURA DURANTE EL S. XXI..... | 35 |
| FIGURA 2-6 PERFIL TEÓRICO DE LA ISLA DE CALOR URBANA | 37 |
| FIGURA 2-7 FORMACIÓN ISOTÉRMICA DE SAN LUIS MISURI (PATRONES OBTENIDOS CADA HORA) | 39 |
| FIGURA 2-8 LA ISLA DE CALOR URBANA EN LA CIUDAD DE MÉXICO EL 13 DE ENERO DE 1997 A LAS 6 HORAS (°C) | 43 |
| FIGURA 2-9 VALORES PROMEDIO Y EXTREMO DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR PARA TRES PERIODOS DEL DÍA EN LA CIUDAD DE MÉXICO (MAYO 1994-ABRIL 1995) 44 | |
| FIGURA 3-1 CALOR ANTROPOGÉNICO Y CARGAS AMBIENTALES | 49 |
| FIGURA 3-2 BALANCE ENERGÉTICO URBANO EN UN VOLUMEN DE CONTROL CERCANO A UNA TORRE MICROMETEOROLÓGICA | 57 |
| FIGURA 3-3 BALANCE DE ENERGÍA MEDIA MENSUAL POR COMPONENTES Y TEMPERATURA DEL AIRE PARA EL AÑO 2001 | 59 |
| FIGURA 3-4 EMPLEO DE LOS ENFOQUES DE INVENTARIO EN CONJUNTO CON LA MODELACIÓN ENERGÉTICA PARA LLEGAR A UNA ESTIMACIÓN INTEGRAL DE LAS EMISIONES DE CALOR LATENTE Y SENSIBLE DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO, QUE PUEDEN SER VALIDADAS UTILIZANDO MEDICIONES LOCALES MICROMETEOROLÓGICAS | 63 |
| FIGURA 3-5 PERFILES CORRESPONDIENTES A A) FLUJO DEL TRÁFICO, B) CONSUMO ENERGÉTICO DOMÉSTICO Y NO-DOMÉSTICO Y C) TASA METABÓLICA HUMANA | 65 |
| FIGURA 4-1 USO DE SUELO EN LA ZMVM, 2010..... | 68 |
| FIGURA 4-2 ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO | 69 |
| FIGURA 4-3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO EN LA ZMVM, 2010 | 72 |
| FIGURA 4-4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA ZMVM, 2010 | 74 |
| FIGURA 4-5 EJEMPLO DE LOS PERFILES DE DISTRIBUCIÓN TEMPORAL POR HORA CORRESPONDIENTES A DOS FUENTES DE EMISIONES DE UNA COMUNIDAD HIPOTÉTICA | 77 |
| FIGURA 4-6 DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LAS ACTIVIDADES DE COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN LA CIUDAD DE MÉXICO, 2010..... | 82 |
| FIGURA 4-7 CURVA DE CARGA TÍPICA DIARIA (CCTD), 2010..... | 84 |
| FIGURA 4-8 DEMANDA ELÉCTRICA HORARIA CORRESPONDIENTE AL SUBSISTEMA CENTRAL DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL, 2010 | 86 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4-9 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL HORARIA DEL CALOR GENERADO POR EL METABOLISMO HUMANO EN LA CIUDAD DE MÉXICO, 2010..... | 88 |
| FIGURA 4-10 ESQUEMA DE VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE LAS EMISIONES DE CALOR ANTROPOGÉNICO..... | 94 |
| FIGURA 5-1 CONTRIBUCIÓN ANTROPOGÉNICA HORARIA AL BALANCE SUPERFICIAL ENERGÉTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES Y METABOLISMO HUMANO (WM^{-2}), 2010..... | 99 |
| FIGURA 5-2 CONTRIBUCIÓN ANTROPOGÉNICA HORARIA AL BALANCE SUPERFICIAL ENERGÉTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (WM^{-2}), 2010..... | 100 |
| FIGURA 5-3 CONTRIBUCIÓN ANTROPOGÉNICA HORARIA AL BALANCE SUPERFICIAL ENERGÉTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR FUENTE Y COMBUSTIBLE (WM^{-2}), 2010..... | 101 |
| FIGURA 5-4 CONTRIBUCIÓN ANTROPOGÉNICA HORARIA AL BALANCE SUPERFICIAL ENERGÉTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR FUENTE (WM^{-2}), 2010..... | 102 |
| FIGURA 5-5 ACTIVIDAD DEL PARQUE VEHICULAR DE MÉXICO (KILÓMETROS RECORRIDOS TOTALES), 1990-2010..... | 110 |
| FIGURA 5-6 PARQUE VEHICULAR EN DISTINTAS ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO, 1990-2010..... | 111 |
| FIGURA 5-7 DENSIDAD POBLACIÓN Y DE EMPLEOS, ZMVM, 1989-2010..... | 112 |
| FIGURA 5-8 DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA GLOBAL POR TRANSPORTE AL 2030 Y 2050 RELATIVAS AL ESCENARIO BASE 2010..... | 113 |
| FIGURA 5-9 MEDICIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA DIARIO BAJO CONDICIONES DE CIELO DESPEJADO EN UN ÁREA RURAL DE VANCOUVER (VERANO 1983), UN ÁREA SUBURBANA DE CHICAGO (JULIO DE 1992) Y EN UN ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (DICIEMBRE 1993)..... | 114 |
| FIGURA I-1 INTERACCIONES DE LAS FUENTES DE INFORMACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE FUENTES MÓVILES..... | 126 |

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

| | |
|----------------|--|
| AP | Automóvil particular |
| AUT | Autobús |
| AUT ESC | Autobús escolar |
| BRT | Autobús de tránsito rápido (Siglas en inglés) |
| CCTD | Curva de carga típica diaria |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad |
| COM | Combi (Vagoneta) |
| EE.UU. | Estados Unidos |
| G.L.P. | Gas licuado de petróleo |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| ICU | Isla de calor urbana |
| INE | Instituto Nacional de Ecología (Ahora INECC) |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística y Geografía |
| IPCC | Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Siglas en inglés) |
| IPTD | Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo |
| KVR | Kilómetros recorridos por vehículo (Siglas en inglés) |
| MB | Metrobús (BRT en el D.F.) |
| MC | Motocicleta |
| MIC | Microbús |
| PNUMA | Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente |
| PU | Camioneta Pick Up |
| SEDESOL | Secretaría de Desarrollo Social |
| SENER | Secretaría de Energía |
| SIN | Sistema Interconectado Nacional |
| SMA | Secretaría de Medio Ambiente |
| SUV | Camionetas particulares |
| T-A | Sistema Tierra-Atmósfera |
| TAX | Taxi |
| TCMA | Tasa de crecimiento media anual |
| TEB | Balance Energético de la Ciudad (Siglas en inglés) |
| TRA | Tractocamión |
| UBL | Capa Límite Urbana (Siglas en inglés) |
| UCL | Capa de edificación (Siglas en inglés) |
| USEPA | Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Siglas en inglés) |
| V | Vehículos de carga |
| VCN | Valores caloríficos netos |
| ZM | Zona metropolitana |
| ZMVM | Zona Metropolitana del Valle de México |

COMPUESTOS

| | |
|-------------------------|--|
| CH₄ | Metano |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO₂ | Bióxido de carbono |
| COT | Compuestos orgánicos totales |
| COV | Compuestos orgánicos volátiles |
| HC | Hidrocarburos |
| HCNQ | Hidrocarburos no quemados |
| N₂O | Óxido nitroso |
| NH₃ | Amoníaco |
| NO_x | Óxidos de nitrógeno |
| Pb | Plomo |
| PM_{2.5} | Material particulado menor o igual a 2.5 micrómetros |
| PM₁₀ | Material particulado menor o igual a 10 micrómetros |
| SO₂ | Bióxido de azufre |

UNIDADES Y PREFIJOS MÉTRICOS

| | |
|------------|--|
| g | Gramo |
| h | Hora |
| J | Joule |
| km | Kilómetro |
| l | Litro |
| m | Metro |
| Met | Medida de la tasa de producción de calor excedente del cuerpo humano |
| µm | Micrómetro (micra), 1 micrómetro equivale a 10 ⁻⁶ metros |
| pu | Unidad de parametrización de la demanda máxima anual de electricidad |
| t | Tonelada |
| W | Watt |

| | | |
|----------|------|------------------|
| P | Peta | 10 ¹⁵ |
| T | Tera | 10 ¹² |
| G | Giga | 10 ⁹ |
| M | Mega | 10 ⁶ |
| K | Kilo | 10 ³ |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Propósito del trabajo

El consumo de energía en las ciudades genera la emisión de calor sensible y humedad a la atmósfera. El propósito de esta tesis es estimar la contribución antropogénica en los perfiles horarios de calentamiento superficial de la región urbana de la Ciudad de México. Para efectos de este trabajo, llamamos balance de energía, al balance térmico derivado de la interacción entre la energía entrante del Sol, la atmósfera superficial, las actividades antropogénicas y la superficie urbana de la Ciudad.

En los diversos estudios asociados al fenómeno denominado isla de calor en las zonas urbanas, se consideran diversas componentes que influyen en la presencia de este fenómeno. Una de ellas es la antropogénica, otras son la localización geográfica, la presencia de cuerpos de agua o las características topográficas, como el tipo y uso de suelo. La componente antropogénica tiene a su vez cuatro subcomponentes considerables, que son el transporte, industria, edificación y metabolismo humano. La edificación considera los sectores residencial, comercial y servicios. Cada subcomponente es modelada a partir de información contenida en estadísticas públicas o resultados de estudios que han sido generados con otros propósitos, como el empleo de información generada para la modelación de inventarios de emisiones.

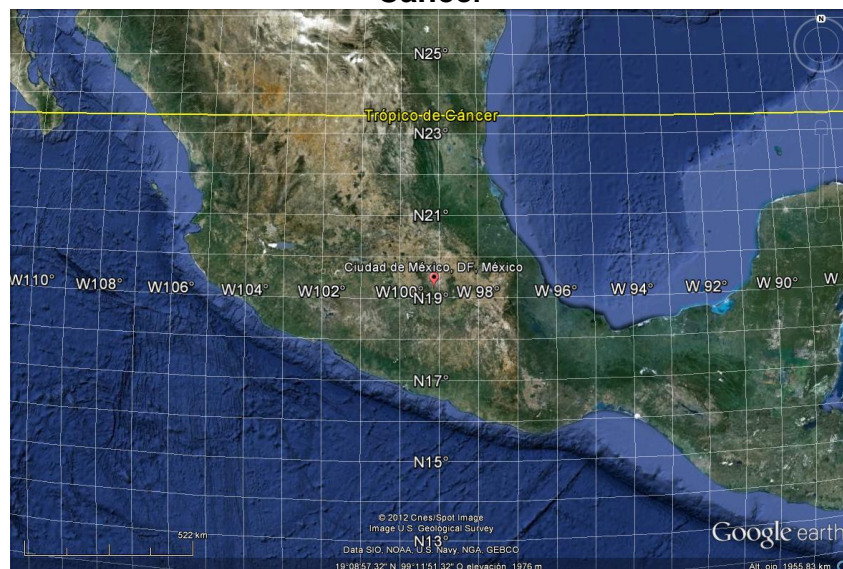
La metodología considerada en el presente trabajo corresponde al ensamble metodológico propuesto por Sailor (2011) para la estimación de la contribución antropogénica al balance energético superficial urbano. Esta metodología aborda distintos enfoques para cada una de las subcomponentes, uno de ellos es el enfoque de inventario que contempla información muy agregada tanto geográfica como temporalmente y por ello es también denominada como metodología de arriba hacia abajo (Top-Down, por su nombre en inglés), este enfoque se utilizó para las subcomponentes de industria y edificación. El otro enfoque propuesto es el de modelación de las fuentes con datos más desagregados y mediante los cuales es posible definir su contribución en pequeñas escalas temporales; este enfoque se denomina de abajo hacia arriba (Bottom-up, por sus siglas en inglés), mediante este enfoque se estimaron las contribuciones de las subcomponentes de transporte y metabolismo humano.

En general, para la validación de un modelo teórico se utilizan mediciones directas de las distintas contribuciones al balance de energía de la capa atmosférica límite en una zona urbana mediante el enfoque de balance residual de energía. Sin embargo, en el caso de la componente antropogénica su contribución está agregada a las de las otras, como el flujo de calor latente turbulento, el flujo de calor sensible turbulento, el calor sensible almacenado y el calor neto de advección; por lo que se estima como equivalente a la diferencia entre la radiación neta recibida por la superficie bajo estudio y la suma de estas componentes.

En este trabajo el resultado utilizado para la validación del modelo es el obtenido por el estudio desarrollado por Oke y Jáuregui (1999), que se menciona también en Tejeda y Jáuregui (2005) para el centro de la Ciudad de México. Estos estudios, a escala microclimática, tienen como objetivo medir las componentes del balance energético de un volumen controlado de la capa de edificación urbana, y por diferencias se estima la magnitud de la contribución antropogénica.

En Oke y Jáuregui (1999) se obtiene un valor de 20 Wm^{-2} para la componente antropogénica de la superficie urbana de la Ciudad de México en 1998. Este valor es cercano al valor promedio horario obtenido en este trabajo que fue de 22.6 Wm^{-2} , con un valor máximo de 37.7 Wm^{-2} .

Figura 1-1 Ubicación de la Ciudad de México con respecto al Trópico de Cáncer



Fuente: Generado mediante la aplicación de "Google earth"

1.1.1. Objetivos

- a) Estimación de la contribución horaria antropogénica al balance energético superficial del suelo urbano de la Ciudad de México; considerando el calor sensible proveniente de fuentes antropogénicas por las actividades de combustión de energéticos y consumo de energía eléctrica.
- b) Identificación de las medidas potenciales de mitigación de calor proveniente de las fuentes antropogénicas ubicadas en la Ciudad de México.

Para el primer objetivo, la estimación de la componente antropogénica (factor conocido como Q_F en la climatología urbana) se consideran las actividades de combustión de energéticos y consumo de energía eléctrica que pueden influir en el sistema climático local y que sumados podrían influir a escalas mayores. Entre estas actividades están el transporte automotor, la industria y la edificación; esta última componente abarca los sectores residencial, comercial y servicios. Así mismo, se considera una componente de procesos biológicos que es el metabolismo humano.

En el siguiente objetivo, se utilizan resultados de escenarios o proyecciones desarrolladas para alguna de las fuentes de calor antropogénico mencionadas. Así mismo, la mitigación de la componente de calor antropogénica al balance energético de la capa superficial, tomará en cuenta aspectos de eficiencia energética, así como otras medidas de planeación urbana que contribuyan a que esta componente energética no tenga un efecto climático local negativo, como el fenómeno conocido como isla de calor urbana.

1.1.2. Relevancia

El resultado de esta tesis está vinculado con dos aspectos de la climatología urbana: La modelación del clima urbano y la explicación del fenómeno de la isla de calor urbana y eventual mitigación.

Los resultados ayudarán: a) para mejorar la modelación climática urbana de la Ciudad de México; b) evaluar mediante proyecciones, el posible incremento de la contribución de la componente energética de origen antropogénico en la exacerbación de la isla de calor urbana.

Por una parte el resultado podrá utilizarse para mejorar la modelación climática urbana en ciudades densamente pobladas y que mantengan similitudes en cuanto al consumo energético. Por otro lado, este resultado podrá usarse para evaluar si la contribución antropogénica al balance energético superficial de la Ciudad de México podría acentuar este fenómeno climático característico de los climas urbanos.

1.1.3. Organización

El desarrollo de este trabajo se presenta en seis capítulos y un anexo. Posterior a la presente introducción, en el segundo capítulo se abordan los antecedentes y el marco teórico para la comprensión y planteamiento del problema. En el primer apartado del segundo capítulo se explica el sistema climático y su estudio a diferentes escalas para poder contextualizar el área bajo estudio y el porqué de la diferenciación hecha del clima como urbano y rural; consecuentemente, en otro apartado se define el balance energético de un sistema climático para comprender la interrelación que existe entre las características intrínsecas de la región y la evolución de las distintas contribuciones energéticas en el día. En el último apartado, se explican algunos fenómenos climáticos que pueden presentarse a distintas escalas y que están correlacionados en alguna medida con la contribución de energética de origen antropogénico.

En el tercer capítulo se exponen las distintas metodologías empleadas para la estimación de esta contribución y que son clasificadas como metodología de Arriba hacia Abajo o de Abajo hacia Arriba (respectivamente Top-Down y Bottom-Up por sus nombres en inglés), y de las cuales se enumeran sus principales ventajas y desventajas. Con base en este capítulo y con los datos disponibles, en el cuarto capítulo se delimita la metodología utilizada para modelar cada una de las fuentes de calor antropogénico objeto de este trabajo.

Una vez establecidos el marco teórico, y las distintas metodologías para estimar la componente antropogénica del balance energético superficial, en el cuarto capítulo se describe el área geográfica bajo estudio de la ZMVM, se plantea el modelo y los supuestos e información utilizados para la estimación de las fuentes de emisión consideradas.

En el quinto capítulo, se presentan los principales resultados de la aplicación del modelo y su respectiva validación mediante el resultado obtenido por Oke y Jáuregui (1999). También, en este capítulo se presentan las medidas convenientes de mitigación de la componente antropogénica, que puedan derivar en la presencia del fenómeno de isla de calor urbana.

Finalmente, en el sexto capítulo, se presentan las conclusiones derivadas del presente trabajo, así como las posibles áreas de oportunidad en el estudio y recomendaciones para trabajos posteriores.

2. ANTECEDENTES

La temperatura superficial media global del planeta ha ido en aumento, los registros muestran que desde la época preindustrial ha habido un incremento cercano a 1°C (IPCC, 2007). A este fenómeno provocado por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y factores naturales se le denomina Calentamiento Global.

Por otro lado, en el sistema climático se llevan a cabo otros procesos que pueden contribuir al calentamiento global. Algunos de los que ocurren en la tropósfera y, sobre todo, dentro de la capa superficial pueden mostrar mayor correlación con la variabilidad de la temperatura superficial (Laat y Maurellis, 2006) que la correlación que tiene con la concentración de los GEI en la atmósfera. Y se considera posible que el efecto acumulativo que tienen las actividades antropogénicas a pequeña escala pueda tener un efecto de calentamiento en la tropósfera baja a nivel local, o incluso regional (Hinkel *et al.*, 2003).

Entre estos procesos se pueden destacar los cambios en el uso del suelo, en el albedo y en los niveles de agua subterránea, la absorción de la radiación solar por la ceniza o el aprovechamiento energético a través de la combustión. En el caso del consumo de energía dentro de zonas urbanas e industriales, los procesos implícitos pueden tener la magnitud suficiente para perturbar un sistema climático a nivel regional e influir en las variables climáticas; como ilustración, el consumo de energía en países altamente industrializados como Alemania alcanzan durante el día los 1.3 Wm^{-2} y en Holanda los 4 Wm^{-2} (Laat y Maurellis, 2006). Sin embargo, en ciudades como Berlín, el consumo de energía puede tener una contribución aún mayor, 21 Wm^{-2} (Taha, 1997), valor comparable a la radiación neta recibida (57 Wm^{-2}) (Tabla 2-2).

Para conocer en qué medida los procesos causados por las distintas actividades humanas pueden afectar un sistema climático se analizan sus contribuciones energéticas. Así, si se conocen los flujos que intervienen por cada proceso o fuente se podrá estimar la contribución antropogénica al balance superficial de energía dentro del sistema climático en cuestión. Las distintas contribuciones a este balance pueden ser de manera directa o indirecta. Por ejemplo, en el calentamiento del clima urbano contribuyen de manera directa tanto los procesos en los que hay disipación de calor a la atmósfera como durante la transformación de energía química a energía térmica; esta contribución a la atmósfera

tiene dos componentes, la primera como calor sensible (no hay cambio de fase) y la otra que puede ser producto del calor latente del vapor de agua (cambio de fase) o de la reacción química debida a la combustión de hidrocarburos. Estas componentes al interactuar con la atmósfera elevarán su temperatura debido a la conducción a nivel molecular. Una fuente indirecta puede ser la topografía, que puede dificultar la dispersión de los flujos de calor, así como los cambios de uso de suelo, que modifican el albedo (Oke, 1987).

El empleo de metodologías Bottom-Up para conocer los distintos flujos de energía en una región, sustentados en la medición del comportamiento de la radiación, flujos de calor sensible y latente netos puede resultar muy costoso, además de que los flujos energéticos por actividades antropogénicas pueden ser difíciles de detectar debido a su relativamente baja magnitud. Con las metodologías Top-Down puede hacerse una estimación de la contribución antropogénica al balance energético superficial. Esta metodología se basa en modelar los distintos flujos energéticos atribuidos a las actividades humanas a partir de modelos e información estadística que permite simular los consumos horarios de energía, que es la información base para conocer el impacto que tiene la contribución antropogénica.

Los procesos de urbanización ocasionan cambios radicales en la naturaleza de una superficie y a su vez de las propiedades de la atmósfera de una región. Por ejemplo, los materiales modernos para la construcción urbana almacenan calor y disminuyen la permeabilidad del agua; a su vez, la geometría de los edificios forma trampas para la radiación y para el estancamiento del aire; por lo que las emisiones de origen antropogénico de calor y agua sustituyen muchas veces a las fuentes naturales (Oke, 1987). Todos estos factores contribuyen a que la ciudad sea más cálida que sus alrededores semi-rurales o rurales, sobretodo en ciudades con latitud entre media o alta. Estas ciudades crean su propio clima en un fenómeno se conoce como isla de calor urbana (Taha, 1997). Otros factores que contribuyen a la formación de la isla de calor urbana son la vegetación, que pueda proveer de sombra a los edificios, y el enfriamiento del aire por evapotranspiración, el efecto de la vegetación se puede ver más acentuado en el verano, y las diferencias de temperatura que pueden observarse con respecto a los alrededores pueden ser hasta de 2.5°C (Taha, 1991).

La isla de calor urbana es el resultado de la suma de cambios microclimáticos debidos a las alteraciones de la superficie hechas por el hombre. La evidencia más clara de este

fenómeno es que las temperaturas de las ciudades se han ido incrementado conforme se han expandido. Por ejemplo, en Tokio las temperaturas se han incrementado notoriamente desde 1920 en mayor medida que las tendencias regionales y durante el periodo rápido de reconstrucción que se dio después de ser ampliamente destruida durante la segunda guerra mundial, la temperatura se incrementó cerca de 1°C (Landsberg, 1981).

2.1. El Sistema Climático

Dentro de los climas locales existe la clasificación de un clima creado por el hombre que se conoce como clima urbano. La influencia urbana está dada en la capa atmosférica denominada capa límite de la ciudad, que no tiene una altura constante y que en un mismo punto puede tener variaciones de altura durante el día (Figura 2-1), y que se define por la turbulencia que genera la fricción del aire con la superficie urbana. “Durante el período diurno los procesos radiativos y convectivos extienden la capa límite hasta 1 ó 2 km de altura en tanto que en horas de la noche decrece hasta unos 100 m (Oke, 1978)”.

El clima urbano es en extremo variable, puede haber días soleados o días lluviosos, días calurosos y secos o días nublados. En el clima, constantemente hay interacción entre la escala local y las escalas mayores, algunas veces dominan los sistemas regionales y algunas veces los locales, pero siempre están todos presentes. Así, cuando se observan fuertes vientos o alta nubosidad, se tiene que las condiciones regionales predominan. En cambio, cuando hay baja o nula nubosidad durante el día y la noche, las condiciones locales son controladas por la atmósfera en sus capas más bajas (Oke, 1987).

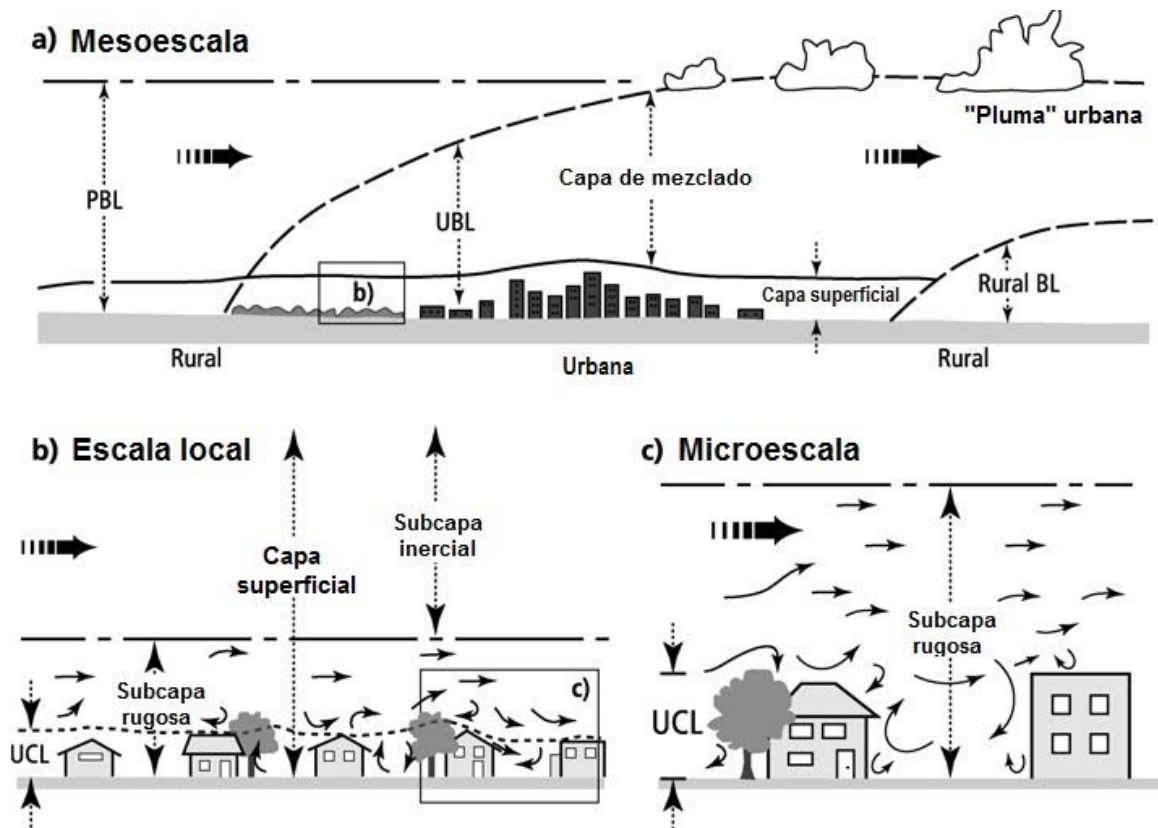
La climatología urbana corresponde a la escala local y contempla superficies de entre cien metros a cientos de kilómetros. También, algunos de los fenómenos que ocurren a esta escala es posible medirlos en unidades de tiempo relativamente pequeña, ya que pueden tener una prolongación que va de unos cuantos minutos hasta un día (Oke y Zeuner, 1992)¹. Ésta unidad de análisis es de las más pequeñas para los estudios climáticos. Las unidades de análisis pueden delimitarse por distintas causas, como pueden ser las características topográficas, su cercanía con el mar o a un área de considerable masa forestal, o también por la cercanía con la influencia humana, y cada una de éstas

¹ Otros autores el estudio del clima de esta extensión lo catalogan dentro de la escala de “Mesoescala” (Yoshino (1975)).

impactará en mayor o menor grado en las condiciones locales de una delgada capa atmosférica en contacto con la superficie y que se conoce como capa límite.

En la climatología urbana solo algunos principios son generalizables, ya que se ha visto que hay una gran dependencia con la ubicación geográfica de la ciudad y su estructura, es decir, depende de la meteorología regional y de la interacción con las modificaciones antropogénicas (Sandrine y Mestayer, 1995).

Figura 2-1 Esquematzación de la capa atmosférica superficial



Fuente: Adaptado de Piringer (Piringer, et al., 2002, pág. 3).

La comprensión de este tema se basa en tres importantes insumos. En primer lugar por las simulaciones en túneles de viento y tanques de agua, de las cuales la mayoría describe la presión que se ejerce sobre el fluido y su dispersión. Por otro lado están las mediciones en sitio, de las cuales muchos son estudios que proporcionan información de un único punto o una estación meteorológica, muy pocas son las que incluyen datos que correlacionen correctamente la microescala climatológica con la meteorología regional.

La última fuente de información proviene de estudios numéricos, los cuales anteriormente presentaban las simulaciones inducidas por las ciudades en la climatología a mesoescala, pero se encontró que con modelos a mesoescala no se puede predecir la climatología de las ciudades con detalle. Desde los años ochenta, los estudios sobre balances energéticos y de radiación urbana permitieron el desarrollo de modelos matemáticos computacionales basados en el comportamiento de la energía en zonas urbanas permitiendo simulaciones sistemáticas. A estos diferentes tipos de información, se debe sumar la obtenida a través de observaciones satelitales para los materiales urbanos (Sandrine y Mestayer, 1995).

El clima urbano se define como la totalidad de cambios microclimáticos surgidos por la alteración del hombre sobre la superficie urbana. Estas alteraciones causadas por los centros urbanos, corresponden a distintos factores, como la topografía y que es definida por sus características topográficas o de la superficie, como la presencia de edificios altos, las calles angostas y asfaltadas o los materiales de los techos. Estas características de la superficie urbana determinan en gran medida a los componentes climáticos locales, como son la absorción de la radiación solar, la temperatura, el viento, la humedad o la precipitación.

Dentro de las ciudades, el estudio de las variables climáticas es muy importante, ya que en el caso de la humedad y la temperatura se pueden establecer índices de confort horario y estacional, así como el delimitar áreas en donde los habitantes se encuentren más o menos confortables durante diferentes horas del día. La humedad, está en función de la permeabilidad del suelo, del rápido o lento escurrimiento del agua de lluvia o de la masa forestal urbana; en cuanto a la temperatura, ésta tiene mayor variabilidad espacial y en ello se observa un patrón en donde las mayores temperaturas se presentan al centro de las zonas urbanas, y que puede ser explicada considerando elementos como las características de la superficie de las zonas urbanas.

Con los registros meteorológicos es posible estudiar las tendencias de las variables climáticas, como son el comportamiento de las precipitaciones, viento, temperatura etc. Es común observar en las grandes ciudades, como la Ciudad de México, mayores temperaturas medias alcanzadas en un año o una, cada vez mayor, diferencia entre las temperaturas de una zona urbana y una zona rural aledaña. Esta diferencia generalmente no excede los 4 grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), pero en el caso de la Ciudad de México ha sido hasta de 10°C (Jáuregui E. , 1991).

Al efecto de un incremento en la temperatura superficial por algunos grados en una ciudad con respecto a la temperatura de una zona rural aledaña, se le denomina Isla Urbana de Calor que, a escala regional, ha sido el efecto más estudiado. Este fenómeno ha sido reconocido por los meteorólogos desde hace mucho tiempo debido a la influencia que tiene en las observaciones diarias del tiempo.

Para comprender las diferencias entre el clima urbano y el clima rural es indispensable describir su correspondiente balance superficial de energía.

2.2. Balance superficial energético

En un sistema se llevan a cabo intercambios de energía, masa (por ejemplo agua), entre otros. Para realizar un balance de alguno de estos elementos se requiere conocer todas las entradas y salidas; se dice que alguno de estos elementos se conserva si la salida, la acumulación y entrada con respecto al sistema se igualan. Para la mayoría de los sistemas naturales esta igualdad es válida cuando se consideran valores dentro de períodos temporales largos (un año). En periodos cortos el balance diferirá significativamente de la igualdad; como en el caso de la energía, en donde la diferencia estriba mayormente en la disminución y aumento del almacenamiento de energía:

Aportación de energía=Salida de energía + Cambio en el almacenamiento de energía

Energía neta del sistema= Cambio en el almacenamiento de energía=Aportación de energía - Salida de energía

La superficie terrestre es en donde la mayor parte de la energía radiada se absorbe, refleja, emite y en donde ocurren las principales transformaciones de ésta (por ejemplo el paso de energía radiante a térmica, o de sensible a latente) y de la masa (cambio de estado físico del agua); también es en donde se interceptan las precipitaciones y en donde ocurre la mayor resistencia del viento (Oke, 1987).

El grado de entendimiento de un sistema climático depende de qué tan bien se conocen los procesos internos del mismo, como el intercambio de masa o energía, y en grado mayor cuando, por ejemplo, se conocen los efectos térmicos de los factores energéticos (Oke, 1982). La energía de un sistema que tiene relevancia climática, como el sistema Tierra-Atmósfera, existe en cuatro formas (radiativa, térmica, cinética y potencial) y su transmisión puede ser por tres modos (conducción, convección y radiación). Así, la energía puede ser particionada en diferentes flujos, y convertida en distintas

combinaciones de formas de energía y de modos de transporte. Para lo cual es importante conocer algunas propiedades físicas del sistema, como su habilidad de absorción, transmisión, reflexión y de emisión de radiación, en su habilidad de conducción y convección de calor, y en la de almacenar energía (Oke, 1987)

El sistema Tierra-Atmósfera (T-A) puede aproximarse a un sistema cerrado en cuanto a masa pero abierto energéticamente. Lo cual significa que no permite un intercambio de masa con el exterior, pero sí puede haber intercambio de energía. La única energía entrante a este sistema es la energía irradiada por el sol.

De manera general, la energía incidente en un medio puede ser transmitida a través de él, reflejada por su superficie o absorbida. Esta última porción resulta en energía retenida o almacenada (Ecuación 2-1).

$$(1 - \alpha)I + \alpha I = G \quad \text{Ecuación 2-1}$$

En donde I es la energía incidente por unidad de área, α es el albedo, α es el coeficiente de absorción de la superficie, y G es la energía retenida por la sustancia.

Es la superficie en donde se llevan las principales transformaciones energéticas que pueden interferir en el sistema climático definido por la superficie y la capa atmosférica límite o capa superficial. Para propósitos climáticos se define como superficie activa al plano principal de actividad climática de un sistema (Oke, 1987). La superficie activa es responsable de la relación que puede haber entre el balance superficial de energía y la temperatura superficial. Durante la mayor parte del día la energía llega a tasas mayores que las del incremento de la temperatura. De tal manera que el momento en que se tiene una mayor temperatura superficial no coincide con el momento de máximo aporte de energía a la superficie. Por lo que la temperatura seguirá en aumento hasta que el aporte de energía sea mayor a la pérdida. Y la mayor temperatura ocurrirá hasta que estos dos flujos se igualen. De aquí en adelante la extracción de energía será mayor que la entrante al sistema por lo que la temperatura comenzará a decaer, hasta llegar a su valor mínimo cuando nuevamente se tenga un balance entre la energía que se almacena y entra.

La energía irradiada por el sol que incide en el subsistema tierra-atmósfera (T-A) atraviesa por distintos procesos antes de ser devuelta a la atmósfera. Esta energía se compone de radiación de onda corta, que en la base temporal de un año la cantidad total de energía deberá ser liberada por el subsistema T-A al espacio. Esta pérdida de energía se realiza

mediante radiación por dos vías. La primera es la reflexión directa de la radiación desde la superficie de la Tierra. La cantidad de energía reflejada dependerá del albedo del sistema y está constituida por radiación de longitud de onda corta², y como la transmitividad del sistema T-A es cero, la parte restante de la energía incidente es absorbida. Esta energía se remite al espacio y se compone de energía de longitud de onda larga (Oke, 1987).

En el periodo de un año el balance energético del sistema T-A Q^* es la suma algebraica tanto de la energía neta de longitud de onda corta como de longitud de onda larga (Ecuación 2-2).

$$Q^* = K^* + L^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Esta equidad difiere durante el día, de manera que durante la noche cuando la radiación solar está ausente:

$$Q^* = L \downarrow - L \uparrow \quad \text{Ecuación 2-3}$$

En donde $K \downarrow$ se refiere a la radiación entrante de onda corta directa y difusa. $K \uparrow$ Se refiere a la cantidad de radiación reflejada de longitud de onda corta, $L \downarrow$ a la radiación de onda larga proveniente de la atmósfera y $L \uparrow$ a la radiación de longitud de onda larga emitida por la superficie al exterior. Durante la noche K^* se anula (Figura 2-2).

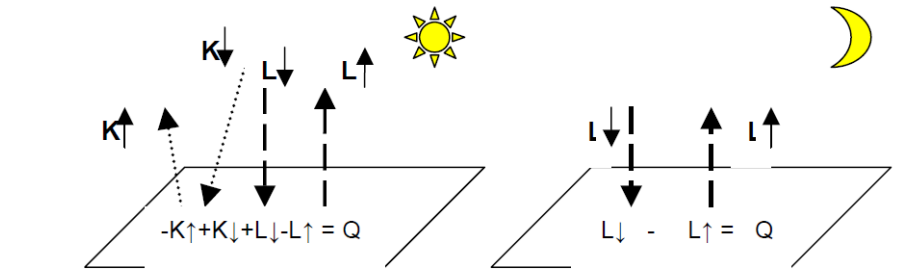
$K \uparrow$ y $L \uparrow$ son términos específicos de cada sitio y controlan las diferencias del balance de radiación entre superficies dentro de la misma localidad, y depende de las características y de las distintas habilidades que la superficie tiene, tales como el albedo que regula la habilidad de reflejar la energía. La porción de $K \downarrow$ que no es reflejada es absorbida por la superficie de la tierra y convertida en energía térmica, la cual calienta la superficie. A su vez, la superficie que ha sido calentada emitirá radiación de longitud de onda larga que es directamente proporcional $4Ts$ en donde Ts es la temperatura superficial. La atmósfera absorbe gran parte de la radiación de longitud de onda larga saliente y emite radiación del mismo tipo hacia el espacio y nuevamente hacia la Tierra.

El curso diurno típico que sigue Q implica durante el día un excedente de energía radiativa en la superficie. Cuando la ganancia neta de energía de longitud de onda corta

² La longitud de onda considerada en las aplicaciones atmosféricas está en el rango de .1 a 100 μm (Oke, 1987).

excede a la pérdida neta de energía de longitud de onda larga y por la noche existe un déficit de radiación cuando la pérdida de energía de longitud de onda larga no es compensada por energía proveniente del sol (Oke, 1987).

Figura 2-2 Esquemmatización del balance radiativo superficial en el día y en la noche



Para explicar cómo es transferida la energía hacia y desde la superficie terrestre se construye una ecuación, que expresa el balance energético del sistema. El balance energético se basa en la primera ley de la termodinámica, que plantea la conservación de la energía. Para una superficie en la Tierra, esto significa que toda la energía absorbida por la superficie debida a la radiación o al calor antropogénico va a algún lugar. Ya sea que sirva para calentar el aire sobre la superficie, como calor latente para la evaporación o el almacenamiento de calor en los materiales. La ecuación del balance de energía es:

Radiación Neta = Convección + Evaporación + Almacenamiento de calor + Calor de advección³

O lo que es lo mismo

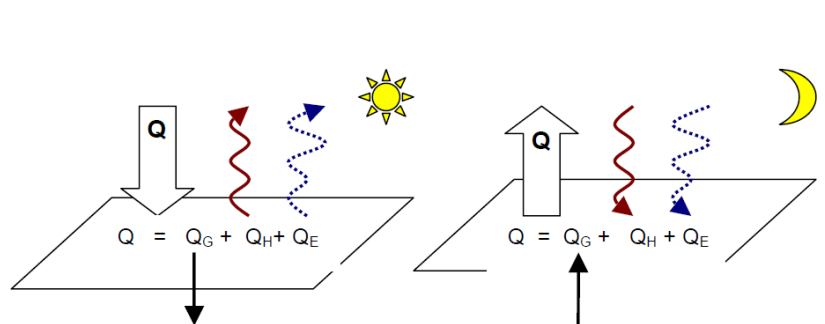
$$Q = Q_E + Q_H + Q_G + \Delta Q_A \quad \text{Ecuación 2-4}$$

³ El calor de advección se refiere a la transferencia de calor por el movimiento horizontal de las masas de aire.

El flujo neto de radiación, Q es el aporte básico al balance superficial de energía. El balance superficial de energía de una superficie es la suma del calor latente, sensible y los flujos de calor procedentes del suelo. El calor sensible, designado por Q_H , se transporta de manera turbulenta entre la superficie y la atmósfera. El calor latente, Q_E , es la energía que es absorbida o emitida cuando hay un cambio de fase del agua. El calor del suelo, Q_G , es el calor transferido desde o hacia el suelo que está debajo de la superficie y ΔQ_A es la variación del calor de advección, es decir el transporte de calor debido al movimiento horizontal. En todo momento cualquier desbalance radiativo superficial es explicado por una combinación de intercambio convectivo hacia o desde la atmósfera, ya sea como calor latente o sensible, y a la conducción desde o hacia el suelo.

Por convención se designa a los flujos no radiativos que salen de la superficie como positivos. Así, los términos del lado derecho de la ecuación 2-4 son positivos cuando representan pérdidas de energía desde la superficie y negativos cuando representan ganancias. En el término del lado izquierdo la radiación neta es positiva cuando hay una ganancia y negativa si es una pérdida. La Figura 2-3 ilustra las situaciones normales para el día y la noche (Oke, 1987).

Figura 2-3 El balance de energía para una superficie de día y de noche



La manera en que Q es dividido en cada una de las componentes Q_E , Q_H y Q_G dependerá de la naturaleza de la superficie y de las habilidades del suelo y la atmósfera para transportar calor. La importancia relativa de Q_E y Q_H está principalmente controlada por

la cantidad de agua disponible para evapotranspiración, pero también depende de la humedad del aire y el gradiente de temperatura (Oke, 1987).

2.2.1. Balance superficial energético considerando la contribución antropogénica de calor

La superficie terrestre se define técnicamente como un plano que separa dos medios diferentes. No contiene energía ni masa, pero es el sitio de transición, es decir, en donde se realizan los intercambios y conversiones de masa y energía (Oke, 1987). El balance de energía superficial debe considerar todas aquellas fuentes de energía o calor presentes, como las antropogénicas.

Un factor a tomar en cuenta son las actividades antropogénicas que emiten energía. La mayoría de éstas suceden en la capa superficial o capa límite de la atmósfera, cuya altura está alrededor de 100 m, aun cuando esta altura puede variar, por la turbulencia.

Otro factor, tal vez el más importante, son los distintos usos del suelo que determinan la capacidad para absorber o reflejar la radiación incidente proveniente del sol o de otros elementos atmosféricos; estos factores junto con otros contribuyen a que los balances energéticos de zonas urbanas y rurales difieran entre sí, aun cuando se trate de zonas aledañas.

Considerando las distintas aportaciones al balance energético superficial la ecuación puede expresarse de la siguiente forma:

$$Q^* + Q_F = Q_E + Q_H + Q_G + \Delta Q_A \text{ Ecuación 2-5}$$

Donde Q^* , es la radiación neta; Q_F , el calor antropogénico; y como en la Ec. 2-4, Q_E , el flujo de calor latente turbulento; Q_H , el flujo de calor sensible turbulento; Q_G , el calor sensible almacenado; ΔQ_A , el calor neto de advección (Shahmohamadi *et al.*, 2011).

El calor antropogénico puede dividirse en el calor generado por fuentes estacionarias y móviles presentes en el área de interés. A su vez esta componente debe partirse en un flujo de calor sensible, otro de calor latente y el calor almacenado. La componente ha sido modelada como la suma de calor generado por la edificación, vehículos y gente, o como el residuo de otros términos.

Para poder estimar la contribución antropogénica al balance energético se analizan las distintas fuentes que contribuyen de manera importante en la generación de calor; aunque

existen dos componentes de calor, la componente de calor latente y la de calor sensible, en donde el calor latente es producto de los procesos de combustión de combustibles en actividades como el transporte, uso habitacional e industrial y el calor sensible se genera a partir de la misma combustión pero además del consumo de energía eléctrica a nivel doméstico, industrial o comercial (Tabla 2-1). En el presente trabajo se considerará que todo el calor que se genera es calor sensible. También, se consideran los procesos metabólicos humanos, que generan calor que es desprendido de la piel en función de las actividades que se realicen pero que en general su aportación no es significativa.

Tabla 2-1 Generación de Calor sensible y calor latente

| Procesos | Componente | |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | Calor sensible (q_h) | Calor latente (q_e) |
| Combustión de energéticos | | |
| Transporte | X | X |
| Doméstico | X | X |
| Servicios | X | X |
| Industrial | X | X |
| Consumo eléctrico | | |
| Uso de electrodomésticos | X | |
| Iluminación | X | |
| Climatización | X | |
| Industrial (motores) | X | |
| Procesos metabólicos | X | |

Así, Q_F puede expresarse de la siguiente manera (Bach, 1970):

$$Q_F = Q_{FV} + Q_{FS} + Q_{FM} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

Donde Q_{FV} es el calor producido por la combustión de energéticos; Q_{FS} es el calor emitido por fuentes estacionarias y que se puede dividir en calor generado por la industria y por la edificación, Q_{FI} y Q_{FE} respectivamente (Ecuación 2-7). Finalmente Q_{FM} se refiere al calor debido al metabolismo humano.

$$Q_F = Q_F + Q_{FI} + Q_{FE} + Q_{FM} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

2.2.2. Balance energético en zonas rurales

El uso de suelo en una zona rural o semiurbana corresponde mayormente a áreas con vegetación, las cuales se conoce que sirven como reguladoras de la temperatura del aire. A este efecto se le conoce como efecto oasis (Jáuregui y Martínez, 2000). Los efectos meteorológicos a nivel micro y meso-escala han sido extensivamente estudiados con distintos propósitos. La mayoría de los estudios ponen énfasis en las diferencias entre el microclima de áreas con vegetación y áreas sin este componente, particularmente en la temperatura del aire (Taha, 1991). Una de las razones por las que la temperatura es menor en un área con vegetación es que el albedo es mayor que para áreas pavimentadas, ya que el primero es de 0.2 y para zonas urbanas está entre 0.08 y 0.15 (Taha, Sailor, y Akbari, 1992).

En una zona rural la densidad de flujo radiativo superficial (Q^*) que está dominado durante el día por el intercambio de radiación de onda corta, y durante la noche únicamente por radiación de onda larga. El excedente (déficit) de energía radiante superficial es disipada (suministrada) por conducción de calor al (desde) suelo (Q_G) y por convección del calor sensible y latente a (desde) el aire (Q_H y Q_E respectivamente). El intercambio de calor entre el suelo y el aire depende de muchos factores, incluida la naturaleza de la superficie, las propiedades termales del suelo y el estado de la atmósfera (especialmente el nivel de turbulencia). Una superficie que cuente con una cubierta de vegetación baja, puede llegar a aportar en el día entre el 80 a 90% del excedente radiativo, durante la noche, el déficit radiativo es equilibrado mayormente por conducción del calor almacenado en el suelo que únicamente representa del 10 al 50% de su capacidad y que extrae de la atmósfera debido a la relativamente baja turbulencia atmosférica (Oke, 1982)

La división entre las formas de calor sensible y latente (Razón de Bowen, β) del transporte turbulento depende en gran medida de la disponibilidad de vapor superficial. Cuando la superficie está mojada, la tasa de evapotranspiración está a todo su potencial y depende únicamente de la disponibilidad de energía y de la temperatura. Cuando la superficie está húmeda, la razón de evapotranspiración decae un 80% de su potencial, a esta condición se le conoce como equilibrio de evaporación y los valores típicos rurales para β (basado en los valores energéticos diarios) están en un rango de 0.4-0.8. Siendo

posible encontrar valores para β en algunas zonas rurales de hasta 1.5 o mayores en latitudes medias (Bailey y Davies, 1981).

2.2.3. Balance energético en zonas urbanas

La presencia de edificios en un área modifica las características radiativas, termales, de humedad y aerodinámicas del ambiente circundante (Oke, 1987). Es por esto que el proceso de urbanización causa cambios radicales en la naturaleza de la superficie y en las propiedades atmosféricas de la región. En una región considerada urbana, la superficie que predomina es el concreto o pavimento, que tiene un albedo menor al de la vegetación.

En el balance energético para una cobertura de edificación (UCL por sus siglas en inglés), las grandes variaciones de las superficies presentes hacen difícil poder realizar alguna generalización. Cada superficie tiene una combinación única de sus características intrínsecas: geometría, posición en el campo del flujo, cercanía a superficies contrastantes que puedan contribuir a la interacción advectiva, etcétera; producen un sinnúmero de arreglos de balances energéticos y por lo tanto de microclimas. A pesar de este aparente caos, hay estudios concernientes a una o más superficies dominantes como pasto, calles, estacionamientos y caminos.

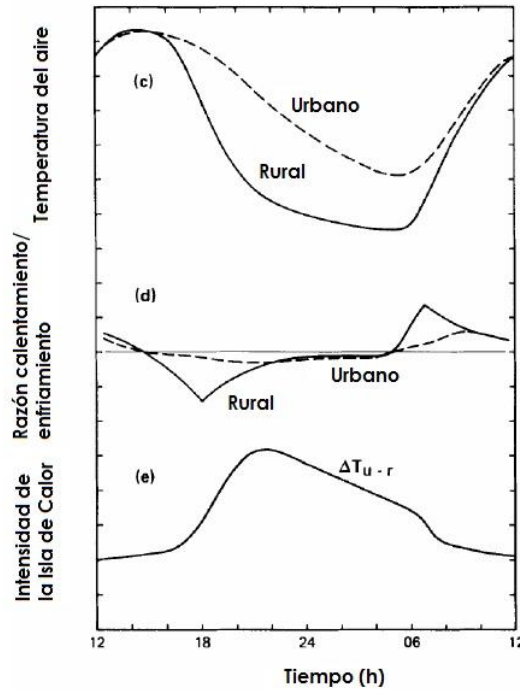
Cualquier intento por realizar una clasificación climática de estas superficies tendría que reconocer el papel que tiene la humedad (capacidad de almacenar agua y la disponibilidad de vapor superficial) como principal criterio. La capacidad de almacenaje es importante en el sentido de que la retención de agua funciona como interface

El perfil del balance energético superficial para cada zona tiene un perfil horario distinto lo que se traduce en distintas tasas de calentamiento y enfriamiento de la atmósfera superficial (Figura 2-4).

Como se muestra en la Figura 2-4 ("c") anterior, los balances energéticos diferentes en zonas urbanas y rurales aledañas originan distintas temperaturas. A este fenómeno se le denomina isla de calor urbana, aunque también puede darse lo contrario, que es que la temperatura de la zona urbana sea menor con respecto a la observada en la zona rural. Este fenómeno se conoce como isla fría y en las ciudades puede presentarse en las

primeras horas de la tarde (Oke, 1987) cuando la turbulencia de la atmósfera baja es mayor.

Figura 2-4 Variación temporal de la temperatura e intensidad de la isla de calor entre una zona urbana y una rural



Nota: La gráfica "c" ilustra la variación temporal de la temperatura de una zona urbana y regional, la "d" ilustra las razones de calentamiento y enfriamiento. Finalmente en "e", se ilustra la intensidad de la isla de calor (la escala vertical de las gráficas "c" y "e" es de 2°C, la de la gráfica "d" es de 2°C h-1)

Fuente: (Oke, 1982, pág. 3)

En la capa de edificación urbana los balances energéticos no consideran de manera explícita la contribución energética por calefacción, industria, transporte, etc. Si estas subcomponentes fueran incorporadas posiblemente tendrían una contribución importante o inclusive dominante al balance de energía local, pero en general sus contribuciones son pequeñas (Oke, 1982).

2.2.4. Balance energético de la capa superficial urbana

Sobre la superficie se identifica a la capa de edificación (UCL por sus siglas en inglés), está en contacto con el suelo y se eleva a una altura igual a la altura media de las edificaciones dentro de los límites de la región estudiada, esta capa está contenida dentro de la sub-capa de rugosidad (RS por sus siglas en inglés) y que verticalmente alcanza

extensiones mayores que en zonas rurales, hasta de decenas de metros sobre la superficie.

La capa superficial contiene a la capa de rugosidad y puede extenderse verticalmente sobre la capa de rugosidad (Figura 2-1, b). En escala regional o mesoescala, sobre la capa superficial se encuentra la denominada capa límite (Boundary layer por su nombre en inglés). Aunque esta capa no está en contacto directo con muchos de los procesos que se desarrollan en la capa atmosférica superficial, sus condiciones climáticas están parcialmente determinadas por las características de la región que le subyace (Oke, 1982)

A una escala que contemple a toda la capa límite urbana (UBL por sus siglas en inglés) el balance de energía debe de ocuparse de integrar todos los intercambios de calor entre la ciudad y el aire que hay sobre de ella. En este caso la superficie de la ciudad corresponde a la interface UCL/UBL, que es la capa superficial (Figura 2-1, a). Los flujos energéticos a través de este plano comprende a todos los flujos de las unidades individuales UCL (es decir todos los techos, cañones, azoteas, árboles, caminos, césped etc.) (Oke, 1982) . De tal manera que al considerar la influencia que tienen todos los elementos de una región urbana en las condiciones climáticas regionales, el balance energético de esta capa puede verse como la suma de todos los balances energéticos a nivel local (Lee, 1984), que considerarán la componente antropogénica.

2.3. Efectos climáticos globales y locales intensificados por la contribución energética de origen antropogénico

2.3.1. Cambio climático local y global

El calor residual producto del uso de la energía, se considera un forzante climático al que se le ha prestado relativamente poca atención tanto a nivel global como local, debido principalmente a su, relativa baja magnitud con respecto a la que alcanza la radiación solar, la primera de estas contribuciones generalmente es del orden de decenas de Wm^{-2} (Sailor, 2004) y la segunda, en latitudes como la de México, con un promedio de $208 Wm^{-2}$ ($5 kWhm^{-2}*día$), pero en algunas regiones del país alcanza valores de $250 Wm^{-2}$ ($6 kWhm^{-2}*día$) (Mulás, 2005) .

El calor antropogénico originado en áreas urbanas ha alcanzado magnitudes comparables a la de la radiación solar (Tabla 2-2). En Barcelona, por ejemplo, su valor ha alcanzado una quinta parte de la radiación solar total, y en algunas ciudades es común que la

supere, como en la ciudad de Nueva York en donde el calor antropogénico es casi el doble (Asimakopoulos *et al.*, 2001).

Tabla 2-2 Calor de origen antropogénico y radiación neta (Considera todas las longitudes de onda)

| Ciudad | Calor antropogénico | Radiación neta |
|-----------------------|---------------------|----------------|
| | Wm ⁻² | |
| Chicago | 53 | - |
| Cincinnati | 26 | - |
| Los Ángeles | 21 | 108 |
| Fairbanks | 19 | 18 |
| San Luis | 16 | - |
| Manhattan, Nueva York | 117-159 | 93 |
| Moscú | 127 | - |
| Montreal | 99 | 52 |
| Budapest | 43 | 46 |
| Osaka | 26 | - |
| Vancouver | 19 | - |
| Berlín | 21 | 57 |

Nota: Los valores presentados son promedios anuales dentro de los límites urbanos de las ciudades. Los datos no incluyen información de las áreas conurbadas o rurales adyacentes.

Fuente: Información de Taha (1997)

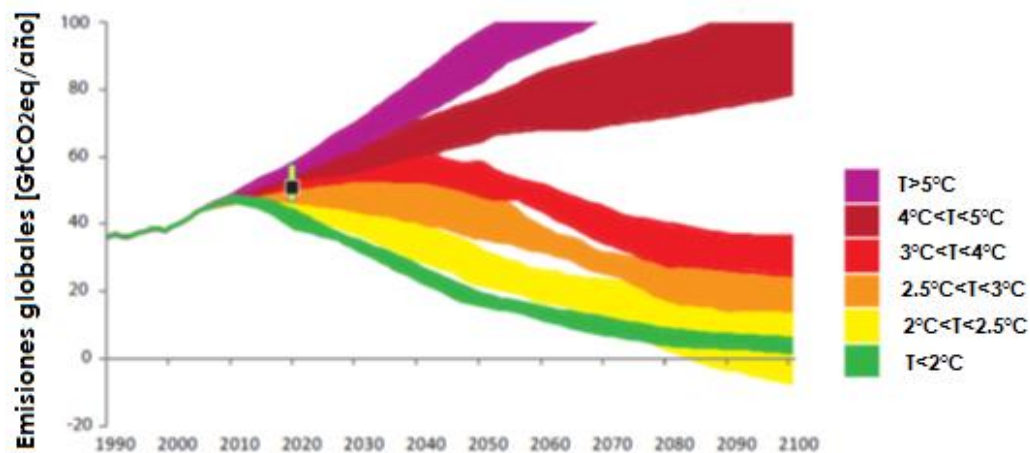
Otros estudios muestran que en las ciudades densamente pobladas la temperatura superficial en las últimas décadas ha aumentado, por ejemplo, en 50 ciudades de los Estados Unidos entre 1951 y el 2000 se ha observado un aumento medio decadal de 0.2 °C (Stone, 2007). En la ciudad China de Guangzhou, que incrementó su población en 100% en los últimos 50 años y en donde se ha advertido una tendencia creciente en la temperatura superficial media, también se ha observado un incremento en la intensidad de la isla de calor urbana (Weng y Yang, 2004).

Bajo tal escenario de crecimiento, el impacto del crecimiento urbano en la temperatura superficial media de algunas zonas urbanas serían similares o mayores a los que se cree podrían ejercer los gases de efecto invernadero en el 2100. Dado que si se conserva la correlación observada entre el incremento de la temperatura media global y las emisiones antropogénicas, y éstas conservan las tasas de crecimiento que han tenido desde la época industrial y no alcanzan un máximo antes del 2020, la probabilidad de que se rebase un incremento de 2°C en la temperatura superficial global media es muy alta

(Figura 2-5). El aumento en la temperatura superficial global media entre 1.5°C y 2°C representa un aumento de la media mundial cercano a la temperatura de la superficie en comparación con el período anterior a la industrialización (alrededor de 1750). Tiene suma importancia que un aumento medio de 2°C o 1.5°C a nivel mundial pueda traducirse en cambios de temperatura mayores en determinados lugares (PNUMA, 2010). En las grandes ciudades ya se registran incrementos en la temperatura mayores a 2°C, lo que conlleva a la presencia de efectos negativos en el confort humano y se vería reforzado con un incremento global de la temperatura.

De manera global es difícil ver de qué manera contribuye el calor residual generado de las actividades antropogénicas, pero a nivel local han comenzado a observarse los efectos que produce en el clima el calor residual, como el que se obtiene de los procesos de combustión de una termoeléctrica cuando no todo el calor generado es aprovechado para la producción de energía eléctrica y parte se libera a la atmósfera, tierra o agua; algunos estudios que se han realizado en ciudades densamente pobladas concluyen que el calor residual, producto de las actividades humanas, debe ser considerado para estimar los patrones climáticos locales (Fan y Sailor, 2005).

Figura 2-5 Niveles de emisiones globales consistentes con un incremento T de la temperatura durante el s. XXI



Fuente: (PNUMA, 2010, pág. 47)

Oke *et al.* (1991) simularon el impacto en la intensidad máxima de la isla de calor por el calor antropogénico debido al uso de energía para calefacción en la edificación. Determinaron que la intensidad de la isla de calor es mayor cuando hay temperaturas ambientales más bajas, pero que en ciudades ubicadas en latitudes medias puede alcanzar valores entre los 2 y 8 grados.

Comprender el papel que juega la contribución antropogénica al balance de energía en un clima local, puede delinear los efectos que tendrá esta contribución a nivel regional o global. Por otro lado, la reducción de la quema de combustibles fósiles contribuye a la mitigación de gases de efecto invernadero y al calor local generado.

2.3.2. Isla de calor urbana y rural

Las zonas urbanas insertas en un medio suburbano o rural tienen temperaturas mayores a la de las zonas aledañas. Cuando estos diferenciales de temperatura entre una zona urbana y una rural aumentan y la primera de ellas tiene una ganancia energética se origina una Isla de Calor Urbana (ICU), llamada así por la forma que asemejan las isotermas obtenidas de una zona urbana y sus alrededores (Montávez, Rodríguez, y Jiménez, 2000).

Las islas de calor urbano se forman generalmente en la noche y se intensifican cuando las condiciones ambientales son más estables (Oke, 1982). Los diferenciales de temperatura tienden a incrementarse conforme aumenta la distancia a las zonas rurales. Los perfiles teóricos de temperaturas son los mostrados en la figura 2-6. En ella se ilustra que la temperatura es más baja en un parque urbano en comparación con la alcanzada en los lugares en donde se localizan las construcciones. Este fenómeno ha sido documentado en muchos estudios, y en ellos se muestra que los parques desarrollan su propio clima y a este efecto se le denomina isla fría, que durante la noche es más pronunciado (Estes *et al.*, 1999).

En regiones cálidas o cercanas a los trópicos, la formación de islas urbanas de calor es un fenómeno que no es deseable, debido a que incrementa los costos por aire acondicionado, las enfermedades relacionadas con el calor e incluso la mortalidad (EPA, 2005).

Figura 2-6 Perfil teórico de la Isla de calor urbana



*CE: Capa de edificación

Fuente: (Shahmohamadi *et al.*, 2010, pág. 755)

En ciudades de latitudes altas, durante el invierno la formación de islas urbanas de calor puede ser benéfica, ya que reduce la cantidad de energía demandada para propósitos de calefacción (Taha, 1997). Pero a pesar de tener este aspecto positivo, este fenómeno atmosférico incrementa la demanda global anual de energía en muchos otros lugares, en donde el incremento por el uso de aire acondicionado en el verano supera el ahorro en energía para calefacción durante el invierno (Gartland, 2011). Así, el fenómeno de isla urbana de calor puede tener consecuencias tanto positivas como negativas, dependiendo de las condiciones climáticas dominantes de la ciudad en que se presente, principalmente dependiendo de su latitud. “Las diferencias en el uso de suelo urbano y rural fomentan la creación del fenómeno de isla de calor debido a la forma distinta en que se disipa el calor proveniente del sol, donde la superficie de la ciudad conserva por más tiempo el calor ganado durante el día, a diferencia de la superficie rural con un enfriamiento más acelerado. La sola presencia de la isla de calor es en sí inofensiva, pero su efecto aunado a las cada vez más frecuentes olas de calor, puede contribuir al deterioro de las condiciones de bienestar y salud de la población” (Ospina, Gay, y Conde, 2013).

Debido a que las ciudades siguen creciendo, las islas de calor urbano son cada vez más frecuentes e intensas, su estudio es abordado por la climatología urbana y se requiere conocer todos los procesos que influyen en su generación para una mejor comprensión y evaluar la posibilidad de mitigar sus efectos negativos.

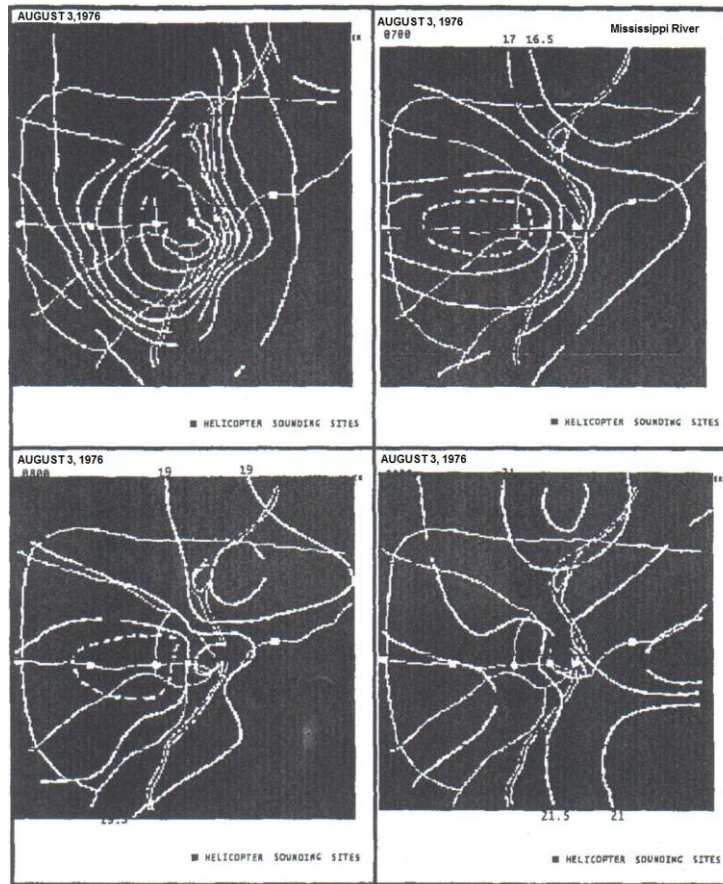
El estudio del fenómeno de isla de calor urbana puede hacerse bajo dos diferentes escalas; una a microescala o local, que es considerando la capa de edificación urbana, cuyo espesor está definido por la altura media de los edificios. La otra, es mesoescala o regional (Oke, 1982).

La morfología de la isla de calor urbana está determinada por diferentes aspectos, como su localización geográfica, es decir; por la presencia de cuerpos de agua, de los factores topográficos, el tipo de suelo de la región y su uso. Pero la combinación posible de estos factores es tan grande como el número de ciudades, y de acuerdo a estos factores es muy difícil generalizar un patrón. Aunque se ha demostrado que existe una relación entre el tamaño de la ciudad y la intensidad de la isla de calor aún falta determinar qué factores físicos están implícitos en lo que se denomina “tamaño”; es decir, en qué proporción este fenómeno se encuentra determinado por factores como el diámetro de la ciudad, la población existente, la arquitectura, los materiales de construcción o el calor de origen antropogénico (Shahmohamadi, 2010).

Estadísticamente ha sido posible determinar cuáles variables meteorológicas gobiernan la intensidad de las islas urbanas de calor, y que son la velocidad del viento y nubosidad (Sundborg, 1952). Sobresale que la velocidad del viento y la intensidad de la ICU no tienen una relación de tipo lineal, sino que ésta es directamente proporcional al inverso del cuadrado de la velocidad. Por otro lado, la nubosidad influye en cuanto al tipo de nube y a la cantidad de ésta, ya que una nube baja es más efectiva que la misma nube a mayor altitud para determinar la intensidad de la isla de calor. El viento y la nubosidad son variables sucedáneas, es decir, que están relacionadas con los roles que tienen la turbulencia y la transferencia radiativa respectivamente en el cambio de temperatura. Estos roles hasta cierto punto se pueden representar por una sola variable, que es la estabilidad atmosférica, que también ha demostrado tener una buena correlación con la intensidad de las islas de calor (Ludwig, 1970).

Sin embargo, cuando se consideran áreas urbanas de mayor extensión, se tiene que la distribución de la isla urbana de calor es tan compleja en distribución como variable en el tiempo. Puede observarse en la Figura 2-7 los patrones de distribución de temperaturas durante el día (3 de agosto de 1976). La complejidad es debida principalmente a las inhomogeneidades que existen en todas las direcciones del terreno, a pesar de que se obtuvieron a partir de un terreno relativamente plano en el área de San Luis Misuri (Godowitch, 1986).

Figura 2-7 Formación isotérmica de San Luis Misuri (patrones obtenidos cada hora)



Nota: Patrones de isotermas deducidas de mediciones realizadas en helicóptero sobre San Luis Misuri el 3 de agosto de 1976 desde las 6:00 a.m. Los contornos que aparentan ser topográficos son las islas de calor.
Fuente: (Godowitch, 1986, pág. 400)

Adicionalmente, la complejidad y variabilidad de los procesos detrás de la formación de la isla urbana de calor, explican el por qué la climatología de las ciudades sigue en una etapa de la descripción de la magnitud de primer orden (Sandrine y Mestayer, 1995).

Las ciudades de latitudes templadas, como la Ciudad de México, muestran una variación estacional de la isla de calor que tiene una mayor frecuencia de ocurrencia e intensidad, durante la parte más cálida que es a mitad del año, especialmente en verano y otoño (Chandler, 1965) (Lee, 1979) (Unwin, 1980). Esto debido en parte a la estacionalidad de los factores meteorológicos, como el viento, nubosidad y la estabilidad de las masas de aire. Aunque muy posiblemente interfieran otros factores que tienen que ver con la cobertura superficial, como la nieve y la vegetación presentes; así como con la influencia solar, como son la modificación del ángulo de incidencia en relación a la geometría de la

ciudad y la presencia de los aerosoles. Así mismo, el hecho de que haya mayor presencia de éste fenómeno en el verano, cuando los mayores requerimientos de calefacción son en invierno, puede indicar que la contribución del calor de origen antropogénico no determine la formación de la ICU.

Aunque existe una amplia investigación para las ciudades de clima templado, se han desarrollado muy pocos estudios para ciudades ecuatoriales o tropicales. Sin embargo se puede decir que para ellas aplica la descripción anterior sobre la formación de las islas de calor. En cambio, para las ciudades de latitudes altas, el esquema es muy diferente; siendo, en principio, debido a que la componente radiativa aportada por el sol tiene una gran variación estacional. De manera que en el invierno hay muy poca o casi nula radiación, y la mayor aportación energética viene de las descargas atmosféricas de calor de origen antropogénico, con esta contribución se relaciona directamente la formación de islas de calor (Bowling y Benson, 1978).

La comprensión del efecto de la isla de calor urbana demanda el tener un marco teórico-conceptual claro, que pueda dar respuesta a las preguntas que se originan a partir de la heterogeneidad en la formación de este fenómeno.

Es claro que una importante causa de la isla de calor urbana debe ser la diferencia entre los balances de energía para una zona urbana y una rural. Sin embargo, aún se está en espera de las observaciones que puedan determinar los factores críticos. Para poder progresar en esa línea es sumamente importante que no se confundan las dos escalas principales de la investigación de la meteorología urbana, a saber: la microescala que caracteriza a los intercambios y climas en la capa de construcción urbana (UCL por sus siglas en inglés), y la mesoescala de la capa límite urbana (UBL, por sus siglas en inglés) (Oke, 1982). Sin embargo, ninguna capa atmosférica debe ser considerada de manera aislada, ya que las condiciones en la capa de construcción urbana son a menudo moduladas por la capa límite urbana, que su vez representa tanto una integración de área de los efectos en la capa de construcción urbana y sus cualidades intrínsecas.

En los primeros estudios sobre la formación de la isla de calor urbana se proponía, de manera un tanto intuitiva, una serie de factores a los que les atribuía su formación, aunque actualmente siguen considerándose los mismos factores y se conoce la capacidad de estos mecanismos para operar en la manera requerida, aún no es posible asignarles un orden de relevancia de acuerdo a su contribución en el desarrollo de la isla

de calor urbana excepto, para algunos casos, como en el de las ciudades de latitudes altas o medias (Tabla 2-3). En donde el fenómeno se presenta de manera muy clara en presencia ciertas condiciones atmosféricas en donde las distintas contribuciones energéticas pueden especificarse, como en las noches de verano sin nubosidad y poco viento.

Tabla 2-3 Posibles causas de la Isla de Calor Urbana (No por orden de importancia)

| | Alteraciones al balance de energía que conlleva anomalías termalés positivas | Características en la urbanización subyacentes a los cambios en el balance de energía |
|----------|---|--|
| A | Capa urbana de edificación | |
| 1 | Incremento en la absorción de radiación de longitud de onda corta | Geometría de cañón- incremento en el área superficial y de la reflexión múltiple |
| 2 | Incremento en la radiación de longitud de onda larga proveniente del cielo | Contaminación del aire- mayor absorción y reemisión |
| 3 | Decremento en la pérdida de radiación de longitud de onda larga | Geometría de cañón-reducción del factor de visibilidad del cielo |
| 4 | Fuentes antropogénicas de calor | Pérdida de calor por los edificios y el transporte |
| 5 | Incremento en el almacenamiento de calor sensible | Materiales de construcción-incremento de la admitancia térmica |
| 6 | Decremento en la evapotranspiración | Materiales de construcción- incremento en la impermeabilidad |
| 7 | Decremento del total del transporte de calor por turbulencia | Geometría de cañón- reducción de la velocidad del viento |
| B | Capa límite urbana | |
| 1 | Incremento en la absorción de radiación de longitud de onda corta | Contaminación del aire-incremento en la absorción por aerosoles |
| 2 | Fuentes antropogénicas de calor | Pérdida de calor en chimeneas |
| 3 | Incremento de calor sensible entrante por debajo | Isla de calor en la capa urbana de edificación-incremento del flujo de calor desde la capa urbana de edificación y las azoteas |
| 4 | Incremento de calor sensible entrante por encima | Isla de calor, rugosidad-incremento de la turbulencia |

Fuente: (Oke, 1982)

A pesar de que el calor antropogénico juega un papel importante en el desarrollo de la isla de calor urbana, éste sigue siendo un factor despreciado en términos de modelación climática, ya que su contribución al balance energético es, en general, pequeña comparada contra la de la radiación solar. Aunque muchos estudios sugieren que el calor antropogénico tiene un rol importante dentro de los mecanismos que generan las islas de calor urbanas, hacen falta más estudios que argumenten porque debe ser considerado dentro de la modelación climatológica.

2.3.3. Estudio del fenómeno de isla de calor urbana en la Ciudad de México

El número de estudios sobre el clima urbano en las regiones tropical (definida entre 23.5 °S - 23.5 °N) y subtropical (entre 23.5-35 °S y 23.5-35 °N) es pequeño, ya que se considera que alrededor del 20% de los estudios desarrollados se refieren a estas regiones. Lo cual resulta contradictorio al ser estas regiones las que han tenido mayores modificaciones en el uso de los recursos, como el uso de suelo debido al aumento de la superficie urbana o de la población en los últimos 50 años, y que pueden alterar la climatología local o regional. Al igual que en las ciudades localizadas en latitudes medias en las ciudades (sub) tropicales se presenta la anomalía termal de isla de calor urbana y su intensificación.

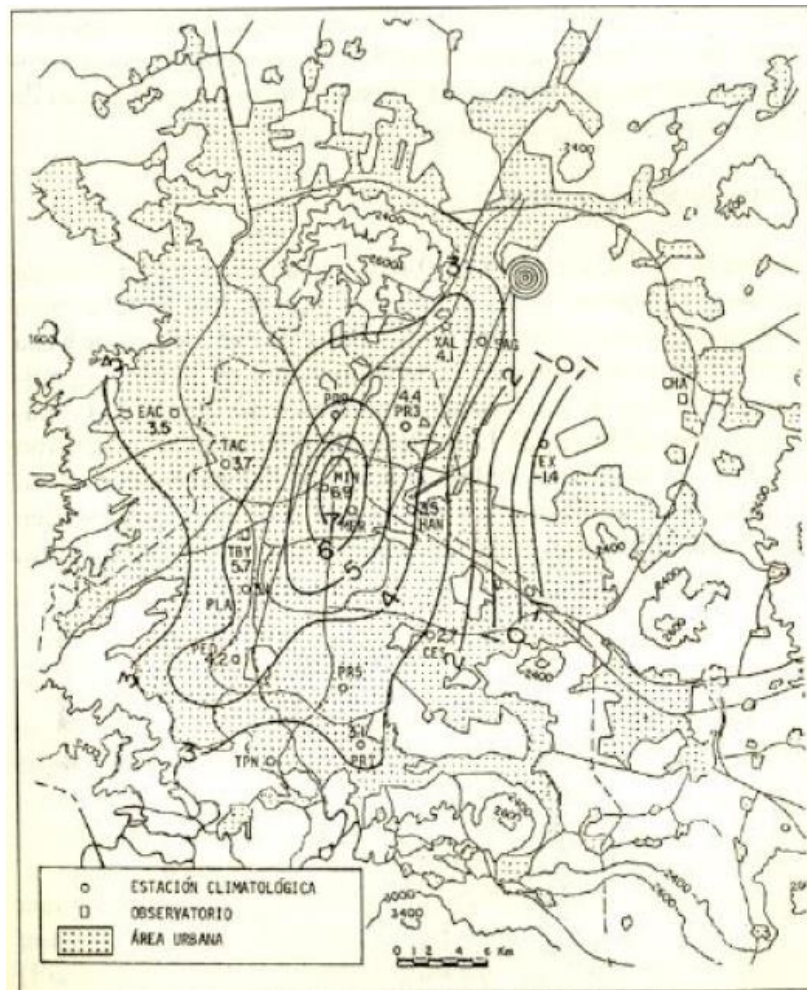
Desde el punto de vista de la climatología en la Ciudad de México, aunque hay algunas diferencias, la respuesta del sistema es en esencia el mismo que el de las ciudades con clima templado (Oke, 1982). "Climáticamente, la ciudad conserva la benignidad de una temperatura que no alcanza extremos incómodos ni tampoco una carencia o exceso de precipitación que dificulte la vida en su interior. Sin embargo, las características del tejido urbano debido en gran parte a la situación socioeconómica de la población, han conducido a modificaciones climáticas que no se pueden ignorar" (Ospina, Gay y Conde, 2013).

En la Ciudad de México se han observado los contrastes termales desde finales del siglo XIX (1895), en donde Manuel Moreno y Anda reportó diferencias termales promedio de 1.4 °C entre el centro de la Ciudad de México en esa época (Palacio Nacional) y una zona rural aledaña (el Observatorio Astronómico de Tacubaya) (Jauregui, 1992). Un siglo después las diferencias de la temperatura del centro de la ciudad y áreas suburbanas aledañas fue de hasta de 8 °C (Figura 2.8).

La isla de calor urbana superficial nocturna, de acuerdo a Jáuregui (1997), se observa con mayor frecuencia (75%) que la ICU diurna. La máxima intensidad de la ICU nocturna (7.8 °C) se registró en temporada de secas (febrero), caracterizada por la presencia de cielos nocturnos claros y estables. Los factores determinantes en la ICU nocturna son la geometría urbana así como las propiedades termales de la superficie (como la admitancia térmica que representa el flujo de calor por área que se requiere para el incremento de la temperatura en un grado Kelvin) (Oke y Zeuner, 1992) y para la ICU diurna los procesos

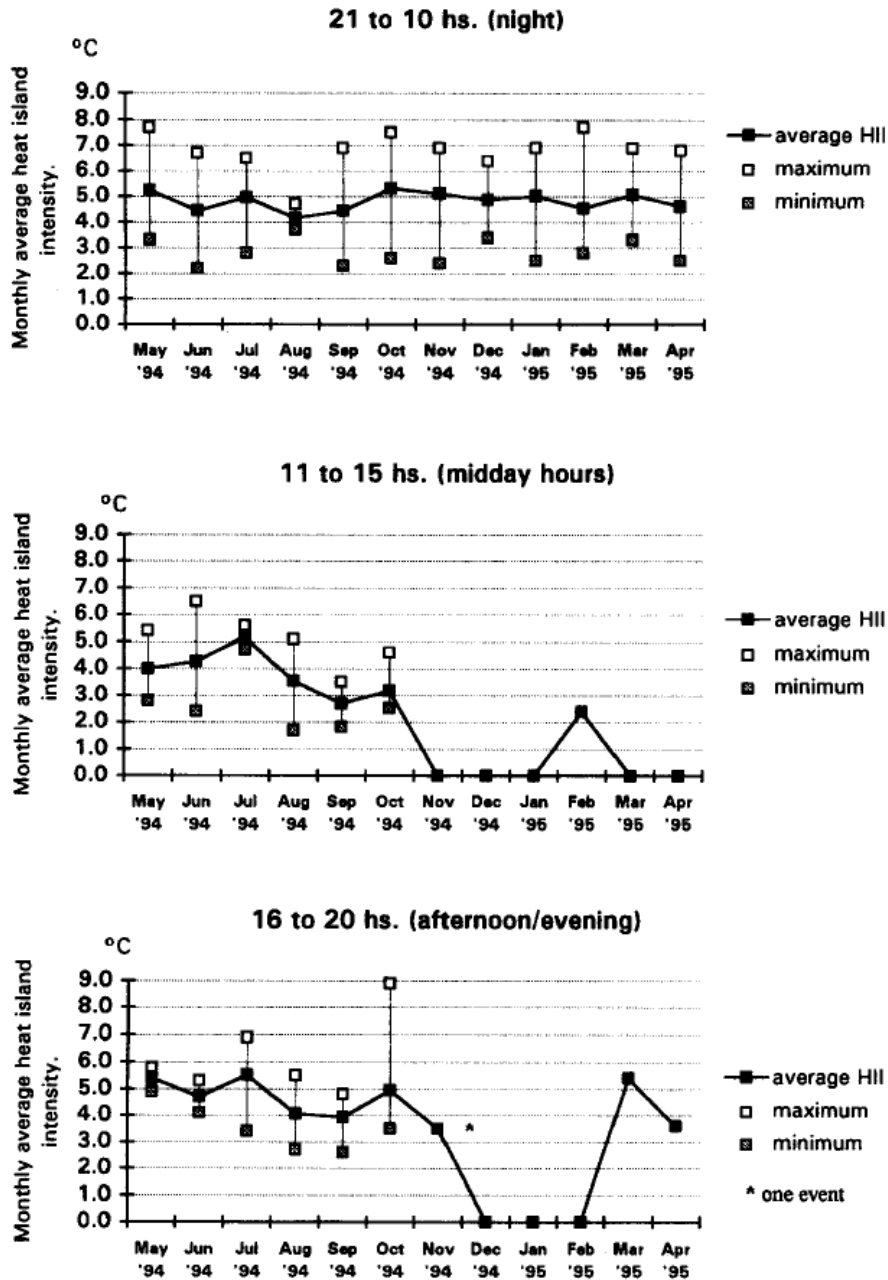
dominantes son el calor sensible turbulento debido al incremento de la absorción de la radiación de onda corta y por las fuentes antropogénicas de calor (industrial y vehicular, principalmente).

Figura 2-8 La isla de calor urbana en la Ciudad de México el 13 de enero de 1997 a las 6 horas (°C)



Fuente: (Jáuregui, 2000, pág. 37)

Figura 2-9 Valores promedio y extremo de la intensidad de la isla de calor para tres periodos del día en la Ciudad de México (Mayo 1994-Abril 1995)



Nota: En las gráficas se muestra la intensidad promedio mensual de la isla de calor en el periodo mayo (1994) y abril (1995). Se observa que la mayor intensidad promedio de la ICU urbana de la Ciudad de México se alcanza en la tarde/noche (de 16 a 20 hr). También se observa que durante los meses de mayo a noviembre se presentó la ICU en los tres periodos de estudio, y en época de secas (diciembre a febrero) la presencia de ICU disminuye o es nula entre las 11 y las 20 hr.
 Fuente: (Jáuregui, 1997, pág. 3825)

Los resultados de un año de observaciones de la formación de la ICU en la Ciudad de México muestran (Jáuregui, 1997):

- a) Las ICU nocturnas son más frecuentes en el periodo de estudio (mayo/1994 a abril/1995). Se presentan mayormente en época de secas, que es cuando la baja admitancia térmica de la superficie rural y la relativa baja humedad del aire permiten un rápido enfriamiento del suelo. Lo que contrasta con la experiencia en regiones en latitudes medias, donde la divergencia de los patrones de enfriamiento urbano y rural produce el mayor contraste termal antes de la media noche.
- b) Los factores determinantes en el desarrollo de la isla de calor en época de secas son los cambios de la velocidad del viento, la nubosidad y la lluvia (particularmente en la región rural), que se asocian a un clima turbulento e inestable. La intensidad de la ICU durante el día fue menor (3-5 °C) y de menor duración que en otra época del año.
- c) La isla de calor urbana observada en la tarde/noche es la más intensa y tiene una intensidad media de 4 a 5 °C. Su frecuencia durante el año fue del 12% de los días. Y se presentaron de igual manera en época de lluvia o secas.
- d) El desarrollo de la ICU nocturna en época de lluvias, se observó alrededor del ocaso y alcanzó su máximo a mitad de la tarde y su mínimo a media noche. Su desarrollo se vio modulado con frecuencia por los eventos rurales de lluvia.
- e) En el estudio se el sensor de temperatura se ubicó sobre la capa de edificación, por lo que es probable que la ubicación influyera en el incremento de las diferencias térmicas durante el día, ya que éste se ubicó 2 metros sobre el nivel de la calle y en donde puede haber diferencias hasta de 2 °C ya que los techos de las construcciones pueden actuar como fuentes de calor.

3. EVALUACIÓN DEL CALOR ANTROPOGÉNICO EN ZONAS URBANAS

El calor antropogénico generado en zonas urbanas puede afectar la temperatura del aire superficial (capa de edificación urbana) y además tiene un rol potencial en el desarrollo de la isla urbana de calor. Aunque su magnitud depende de varios factores como la intensidad en el uso de la energía, generación de energía y sistemas de transporte, los valores mayores típicamente se encuentran durante el invierno en los centros urbanos de ciudades con climas fríos, debido principalmente al mayor uso de energía para la calefacción durante esa estación (Taha, 1997). En la mayoría de las grandes ciudades de EE.UU., este factor se encuentra en un rango de 20 a 40 Wm^{-2} en verano y entre 70 y 210 Wm^{-2} en el invierno (Taha, 1977).

El calor y las emisiones de humedad antropogénicas varían significativamente en tiempo y espacio, y no son fácilmente medibles. Como resultado, modelos detallados de estas emisiones no son comunes en la mayoría de las ciudades. Además, la mayoría de estos intentos se han enfocado en el cálculo de la componente de calor sensible, ignorando ampliamente las emisiones de humedad con el empleo de importantes supuestos, o como la equivalencia entre el consumo de energía y el calor sensible de origen antropogénico; así, esta sobre simplificación ha limitado la precisión de las estimaciones de calor antropogénico resultantes (Sailor, 2011).

La contribución antropogénica al balance de energía, ya sea mediante calor o humedad, se puede estimar mediante distintos métodos que difieren entre sí en cuanto al nivel de detalle espacial y temporal. Las metodologías más detalladas pueden no ser fácilmente replicables o aplicables a un amplio número de ciudades. Ya que son análisis muy finos que a la fecha han sido aplicados en un reducido número de ciudades. A grandes rasgos, existen tres metodologías mediante las cuales se puede evaluar ésta contribución. Una de ellas es el método de inventario, que se basa principalmente en información sobre el consumo de energía, o datos resultantes de encuestas de consumo, esta información es proporcionada generalmente por las mismas empresas del sector eléctrico; por la agregación de la información puede ser considerada una metodología de arriba hacia abajo (o top down por si siglas en inglés). Por otro lado, se tiene el método de balance energético en un volumen de control, el cual consiste en la medición de la radiación neta dentro de un volumen delimitado por un radio en torno a la estación de medición. Este

método puede combinarse con información satelital. Por último, está la estimación basada en la construcción de modelos energéticos para la edificación urbana. Con este enfoque se trata de dar mayor certidumbre al calor generado por la edificación, mediante la modelación del consumo energético y el calor expulsado.

Algunos ejemplos en los que se ha utilizado este último método, que se conoce también como alcance de abajo hacia arriba son los desarrollados por Clark *et al.* (1985), Grimmond (1992), Harrison *et al.* (1984), Fujino *et al.* (1996), Hiramatsu *et al.* (1992), Ichinose *et al.* (1994), y Klysik (1996) para Nueva York, Vancouver, Londres, Tokio, y Lodz respectivamente. Estos estudios requirieron de un enorme esfuerzo en la obtención de la información de consumo de energía a nivel de construcción (Sailor, 2004).

Por consiguiente, el enfoque metodológico de arriba hacia abajo (Top-down), demanda menores esfuerzos para la obtención de la información. La información requerida bajo este enfoque resulta más difícil de ubicar espacial y temporalmente, ya que muchas veces están agregadas a nivel estatal y de manera mensual, en cambio el enfoque de abajo hacia arriba, para el caso de la edificación, puede describir el perfil antropogénico de manera horaria para cada construcción. En la componente del transporte sucede algo similar.

La incertidumbre que cada uno de estos enfoques tiene no difiere mucho entre sí, ya que aún en los casos en donde se alimenta al modelo con información muy detallada, los supuestos y aproximaciones requeridas para la generación de un perfil antropogénico de energía conduce a niveles de incertidumbre relativamente altos. Esto inevitablemente nos hace cuestionar el costo-beneficio que conlleva la recolección tan detallada de la información.

Otra consideración importante que debe hacerse es en cuanto a los supuestos a utilizarse para evaluar la contribución antropogénica al balance energético; es decir, cuáles fuentes se evaluarán, si el flujo de calor antropogénico se considerará en su totalidad como calor sensible o si también como calor latente, etc.

3.1. Descripción de las fuentes antropogénicas de calor en zonas urbanas

La generación de calor por fuentes antropogénicas en las zonas urbanas por orden de importancia son el transporte; la industria; la edificación, que incluye a los sectores comercial y residencial; y el metabolismo humano. La liberación de calor se lleva a cabo

mediante los procesos de combustión, por ejemplo en calderas, motores o pequeños equipos de combustión de uso residencial.; así como por el consumo de energía eléctrica por las distintas aplicaciones a nivel residencial, comercial e industrial; y finalmente, por los procesos metabólicos tanto de los humanos como de los animales. Todos estos procesos disipan importantes flujos de calor, debido principalmente a la mayor concentración de población que tienen las zonas urbanas con respecto a las rurales y a la intensidad en el uso de los energéticos.

Las descargas de calor de estas fuentes pueden ser directas a la atmósfera, como en el caso de los vehículos, que es cuando se considera que el perfil de consumo energético de los vehículos y su contribución al balance energético superficial coinciden en la práctica, igualmente para las emisiones por el metabolismo humano de las personas que se encuentran en el exterior. Pero esto no aplica cuando la energía es consumida al interior de los edificios o las personas se encuentran dentro de éstos, debido a la presencia de resistencia que dificultan la transferencia de calor, representada por R_1 en la figura 3-1. El calor transferido por una construcción a la atmósfera ($Q_{ex,B}$) puede ser mayor que el proveniente por las fuentes antropogénicas en su interior ($Q_{F,B} + Q_{F,M}$), ya que incluye la radiación en onda corta y onda larga que es absorbida por las construcciones (Q_R) menos el calor disipado en el suelo (Q_G), también el tiempo en que el calor es expulsado puede tener una demora que depende de la inercia térmica de la construcción (Iamarino, Beevers y Grimmond, 2011).

3.1.1. Procesos de combustión

Los procesos de combustión que contribuyen de manera importante a la generación de calor son tanto los de gran escala, por ejemplo calderas o turbinas que ocurren en la industria, como aquellos a pequeña escala, como el empleo de gas L.P. en aplicaciones residenciales o el uso de gasolinas en el transporte.

Dentro de los diferentes sectores evaluados en el presente trabajo, se tiene una importante contribución a las emisiones de calor antropogénico por la combustión de distintos combustibles fósiles, según lo reportado por los inventarios de emisiones a la atmósfera en grandes urbes el mayor consumo de combustibles se ubica en el sector transporte.

3.1.2. Consumo de energía eléctrica

El consumo de la energía eléctrica se realiza prácticamente en todos los sectores analizados, industrial, residencial, transporte, comercial y de servicios. En éstos las diversas aplicaciones que se tienen contribuyen de manera importante a la generación de calor antropogénico.

Las aplicaciones pueden ir desde la iluminación, funcionamiento de electrodomésticos o de equipos de aire acondicionado, hasta equipos industriales de refrigeración, motores o bombas.

3.1.3. Procesos metabólicos

Otra fuente antropogénica de generación de calor son los procesos metabólicos humanos. El cuerpo humano produce calor de manera constante debido a los procesos bioquímicos presentes en la formación de tejido, la conversión de energía y el trabajo muscular, entre otras funciones fisiológicas. Una gran parte de la energía requerida por estas funciones es proporcionada por el consumo de alimentos.

Al proceso encargado de la conversión de los alimentos en materia viva y en energía útil se le conoce como metabolismo. Se considera que el cuerpo humano utiliza el 20% de la energía producida y que el 80% restante se disipa en el ambiente. El calor generado en este proceso se denomina calor metabólico.

La producción global de calor metabólico se deriva tanto del metabolismo basal como del metabolismo muscular. El primero está relacionado con la energía empleada en las reacciones químicas intracelulares para la realización de las funciones metabólicas esenciales, como la respiración y la digestión. En otras palabras, representa la producción de calor en los procesos automáticos, continuos e inconscientes del cuerpo humano. El metabolismo muscular, por otro lado, se relaciona con la producción de calor en los tejidos musculares mientras se lleva a cabo algún tipo de actividad física.

Las tasas de producción de calor excedente del cuerpo humano se suelen medir mediante la unidad Met, que equivale a 58 watts por metro cuadrado de piel (Wm^{-2}). Un Met representa el nivel de actividad de una persona en reposo. Nuestro metabolismo generalmente se reduce al mínimo cuando dormimos, produciendo apenas 0.7 Met, pero puede sobrepasar los 10 Met cuando realizamos actividades físicas muy intensas. También se emplean las unidades de watts por persona ($W/persona$), parámetro basado

en un hombre adulto promedio con una superficie de piel de 1.8 m². Otro parámetro conocido como factor metabólico se utiliza para representar las variaciones en la constitución física, un índice metabólico de 1 corresponde al hombre promedio previamente mencionado, a una mujer se le asigna 0.85 de este factor y aun niño le correspondería un 0.75.

La producción de calor del cuerpo humano depende principalmente de los índices de metabolismo basal y de las actividades que realiza (metabolismo muscular). En la Tabla 3-1 pueden observarse las tasas de calor excedente de algunas actividades físicas expresadas en cada una de las unidades:

Tabla 3-1 Tasas de calor metabólico excedente de acuerdo al nivel de actividad

| Actividad | Wm ⁻² | Índice metabólico | Wp ⁻¹ |
|-------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Dormir | 40 | 0.7 | 72 |
| Estar acostado (despierto) | 45 | 0.8 | 81 |
| Estar sentado en reposo | 60 | 1.0 | 108 |
| Estar sentado con actividad ligera | 64 | 1.1 | 115 |
| Estar de pie sin movimiento | 70 | 1.2 | 126 |
| Estar de pie con actividad ligera | 78 | 1.3 | 140 |
| Estar de pie con actividad moderada | 93 | 1.6 | 167 |
| Trabajo manual ligero, cocinar | 100 | 1.7 | 180 |
| Caminando en horizontal (2 km/h) | 110 | 1.9 | 198 |
| Bailando (actividad social) | 111 | 1.9 | 200 |
| Construcción ligera | 125 | 2.2 | 225 |
| Trabajo manual moderado, ejercicio | 139 | 2.4 | 250 |
| Lavar platos | 145 | 2.5 | 261 |
| Limpieza doméstica | 150 | 2.6 | 270 |
| Ejercicio moderado | 167 | 2.9 | 300 |
| Lavar a mano, planchar | 170 | 2.9 | 306 |
| Construcción moderada | 180 | 3.1 | 324 |
| Caminando en horizontal (5 km/h) | 200 | 3.4 | 360 |
| Trabajo manual pesado | 235 | 4.1 | 423 |
| Ejercicio intenso | 250 | 4.3 | 450 |
| Construcción pesada | 275 | 4.7 | 495 |
| Ejercicio y trabajo muy intensos | 450 | 7.8 | 810 |
| Correr (15 km/h) | 550 | 9.5 | 990 |

*El Met es el calor emitido por metro cuadrado de piel, 1 Met=58.2 W/m²

**p: persona

Fuente: Accesado 8.06.2013 en <http://sol-arg.com/index.php/confort-humano/producción-calor>

3.2. Metodologías Top-Down para la generación del perfil de la contribución energética antropogénica

Una de las formas de obtener el perfil de generación de calor antropogénico en una región es mediante el enfoque de arriba hacia abajo o Top-Down. Las mayores fuentes de calor generadas por el hombre provienen del empleo de combustibles, como en el transporte, la vivienda o la industria.

La evaluación de la componente de calor antropogénico por el método de inventarios se realiza a partir de información de consumos energéticos, que usualmente tienen datos a muy baja resolución tanto espacial como temporal. Este enfoque depende de información sobre el consumo energético que se genera para otros propósitos.

En la mayoría de los estudios bajo este enfoque se realiza el supuesto de que el consumo energético es equivalente a las emisiones de calor sensible, y que no se tiene una partición en dos componentes, que son calor latente y sensible (Sailor, 2011). Más aún, éstos generalmente utilizan un mecanismo que les permite mapear el consumo anual o mensual conocido, en perfiles diurnos. Así mismo, deben mapear las estimaciones de las emisiones de toda la ciudad o nivel regional en una rejilla más fina para representar la variabilidad espacial dentro de la ciudad.

3.2.1. Método de inventario: estudio previos

Con esta metodología se pretende modelar un patrón de consumo energético a partir de información y estadísticas que sirven, generalmente, para otros propósitos y que por ello son datos que se encuentran agregados o con muy poca resolución en tiempo y espacio; pero que con ayuda de ciertos supuestos pueden ser útiles para obtener los perfiles horarios para algunas de las fuentes. Por ejemplo, el perfil horario del consumo eléctrico en una ciudad, en un caso ideal, debería obtenerse a partir de las curvas de demanda de cada planta generadora que la abastece. Sin embargo, como en el caso de la ciudad de México, el sistema eléctrico que la abastece es normalmente un sistema interconectado que da servicio a una región más extensa. Aunado a esto, las curvas de demanda diaria pueden presentar problemas para su obtención ya que representan un volumen de información de difícil manejo. En el presente trabajo, se utilizan las curvas de demanda de energía eléctrica promedio en un mes, obtenidas del área de control y despacho que abastece a la Ciudad de México (CFE, 2011).

En la mayoría de las aplicaciones de esta metodología se ha caído en el supuesto de que el consumo de energía es igual a las emisiones de calor sensible, sin considerar algún retraso para la transformación, las cargas ambientales y tampoco la partición del calor generado en las componentes de calor sensible y calor latente (Sailor, 2011). Aunado a ésto, se emplea algún mecanismo o serie de supuestos para poder mapear los consumos anuales o mensuales en perfiles diurnos (horarios). A nivel espacial se presenta algo análogo, ya que las emisiones que se obtienen se agregan a nivel de región o ciudad y se bajan a una escala más fina para poder representar la variabilidad dentro de la ciudad.

Taha (1997) enumera diversos estudios en donde se emplea el enfoque de inventarios y en los que se tiene que la variabilidad del calor antropogénico se encontrará entre 15 y 150 Wm⁻² durante el año. En dichos estudios se encuentra el de Torrance y Gutman (1975), que fue de los primeros en utilizarlo, a partir de datos anuales de consumo de energía y de densidad de población se estima la contribución antropogénica en 83.7 Wm⁻². Una de las herramientas empleadas en esta estimación fue el modelo para obtener el empleo de la calefacción en función de la temperatura media diaria. La componente de calor generado por la industria fue asumida como constante y la del transporte fue evaluada con información sobre el tráfico horario promedio de la ciudad. Este modelo representó la variación espacial del calor antropogénico de manera muy limitada, únicamente diferenciando únicamente las zonas urbanas de las rurales. Pero a pesar de estas limitaciones, este estudio fue quizás el primero en estimar las emisiones antropogénicas de calor (valor mayor a 135 Wm⁻² para un día de verano en una ciudad densamente poblada) y el impacto resultante en las temperaturas del aire urbano. Específicamente, a través del uso de un modelo atmosférico transitorio unidimensional, Torrance y Gutman (1975) estimaron que el calor antropogénico calculado podría resultar en un aumento de la temperatura de más de 4°C.

Estudios subsecuentes han mejorada tanto en la resolución espacial como la temporal gracias a la desagregación de la información sobre el consumo energético. Kimura y Takahashi (1991), utilizaron información detallada sobre el uso del suelo en combinación con datos de consumo energético para estimar el impacto del calentamiento antropogénico en las temperaturas del aire urbano en Tokio. Mientras utilizaban un alcance bastante simple para estimar el perfil diurno, fueron capaces de sacar ventaja de datos de uso de suelo detallados (2km por 2km) reticulados que fueron utilizados para crear un mapa espacial más realista sobre la emisión de calor antropogénico. El pico de

calor antropogénico resultante de este análisis estuvo en el orden de los 100 Wm^{-2} . Alimentando las emisiones resultantes de calor sensible antropogénico en un modelo numérico hidrostático multi-dimensional, posteriormente estimaron que la mayor parte de las Islas Urbanas de Calor que se forman en Tokio ($2\text{-}3^{\circ}\text{C}$) durante la noche en el verano es debido al calentamiento antropogénico. Esto último fue particularmente significativo, ya que ilustra el rol importante que el calor antropogénico juega en la formación de las islas urbanas de calor.

Alcances similares han sido empleados en un rango de regiones urbanas alrededor del mundo como en Corea por Lee y Baik (2010) o en Londres por Harrison, McGoldrick y Williams (1984). Uno de tales ejemplos es el trabajo desarrollado por Klysik y Fortuniak (1999), quien usó la metodología de inventarios para estimar las emisiones de calor antropogénico en Lodz, Polonia. En éste, los datos del consumo anual de energía para la calefacción fueron mapeados utilizando los perfiles de temperatura mensual del aire. La densidad de población fue utilizada como una métrica para diferenciar la variabilidad espacial en el consumo de la energía eléctrica. La componente atribuida al sector transporte se calculó por medio de las ventas anuales de combustible. Aunque fue un estudio con poca resolución tanto temporal como espacial, el análisis desarrollado por Klysik sugiere que el promedio mensual de las emisiones antropogénicas de calor en verano alcanzan 12 Wm^{-2} y en invierno 54 Wm^{-2} .

Ichinose, Shimodozono y Hanaki (1999) dieron un paso al frente en cuanto a la resolución espacial del calor antropogénico. Lo que hicieron fue ligar las estadísticas energéticas de varios tipos de edificios y sus usos finales en Tokio [previamente obtenidos por Ichinose, Hanaki y Matsuo (1994)] con el uso de suelo digitalizado muy detallado (se manejaron 12 tipos de uso de suelo) y con ello estimaron el calentamiento antropogénico a una resolución de celdas de 25m por 25m . Como se esperaba, la alta resolución espacial dio lugar a estimaciones muy elevadas asociadas a celdas centradas en altos edificios de oficinas. Específicamente, encontraron que el consumo horario de energía a esta escala (asumiendo que el consumo es igual al calor sensible) puede ser tan grande como 1590 Wm^{-2} en el invierno y de 400 Wm^{-2} en el verano para las horas de luz de día. Además de esta estimación el análisis logró integrar las estimaciones dentro de una simulación numérica (utilizando el modelo a mesoescala de la Universidad Estatal de Colorado). Encontrando que el calor antropogénico resultaba en elevaciones de la temperatura del

aires de menos de 1° C durante las horas de luz, y podía subir hasta 1.5° C durante la noche. En invierno, cuando la magnitud del calor antropogénico era mucho mayor (y la mezcla del aire presumiblemente menor), encontraron que el calor nocturno ascendía a 2 o 3° C.

Fan y Sailor (2005) implementaron la metodología de inventario que utilizó Sailor (2004) en un estudio sobre el calor antropogénico en Filadelfia, Pensilvania. El estudio encontró un pico para el uso de la calefacción a la escala de la ciudad de 60 Wm⁻² en verano y aproximadamente de 90 Wm⁻² en el invierno. El Impacto debido a este consumo energético en las temperaturas urbanas fue de 1°C en verano y de 3°C en el invierno. Una característica distintiva del método presentado en Sailor y Lu (2004) es que enfatiza el uso de información que puede ser obtenida casi para todas las ciudades de Estados Unidos. El modelo asume que el calor antropogénico es igual al consumo de energía y que la conversión es únicamente en calor sensible. Otra limitación del trabajo es que no provee de un mecanismo para mapear el consumo por calefacción de la ciudad dentro de una escala más fina.

Sin embargo, su amplia aplicabilidad dio lugar a que el método se aplicará a 50 ciudades de Estados Unidos en Sailor y Fan. (2006).

En un estudio para la ciudad de Londres, Hamilton *et al.* (2009) utilizaron un alcance similar del método de inventarios para estimar el consumo de energía por la edificación a lo largo de toda la ciudad, logrando mapear el consumo en rejillas de 1 km basados en información de uso de suelo y las características de construcción. Con ello encontraron importantes variaciones tanto espaciales como temporales del calor antropogénico, promedio de 9 Wm⁻², pero notaron que las variaciones espaciales y diurnas eran mayores.

Recientemente ha habido un creciente interés en la implementación del calor antropogénico dentro de modelos de circulación de gran escala. Estos esfuerzos también han utilizado un alcance basado en la metodología de inventario con representaciones necesariamente burdas de las variaciones espacial y temporal. Al tiempo que se observaban los impactos del calentamiento antropogénico en climas regionales del centro de Europa, por ejemplo, Block, Keuler y Schaller. (2004) empleó estimaciones de consumo energético regional y de densidad de población como una aproximación para estimar las emisiones de calor de origen antropogénico. Este trabajo simplemente asumía

que el calentamiento era constante en el tiempo, y la magnitud del calor de origen antropogénico obtenida fue de 14.5 Wm^{-2} o menos a lo largo del área de estudio.

Flanner (2009) también empleó la metodología de inventario para estimar el calor de origen antropogénico que se consideraría en modelos climáticos globales. Su trabajo consistió en el mapeo a escala de país a rejilla de celdas de 2.5 por 2.5 minutos de latitud/longitud utilizando la densidad de población. Con base en el trabajo desarrollado por Sailor y Lu (2004), Flanner empleó funciones pesadas para crear perfiles estacionales y diurnos. Debido a la baja resolución del análisis, la magnitud resultante del calor de origen antropogénico fue relativamente baja.

Limitaciones:

Todos los estudios que han empleado la metodología de inventario sufren de dos principales limitaciones: a) asumen que el consumo de energía es equivalente a el calor sensible de origen antropogénico, lo cual no es del todo cierto, ya que los procesos de combustión tienen entre sus principales productos vapor de agua, y b) las resoluciones temporales y espaciales son relativamente grandes.

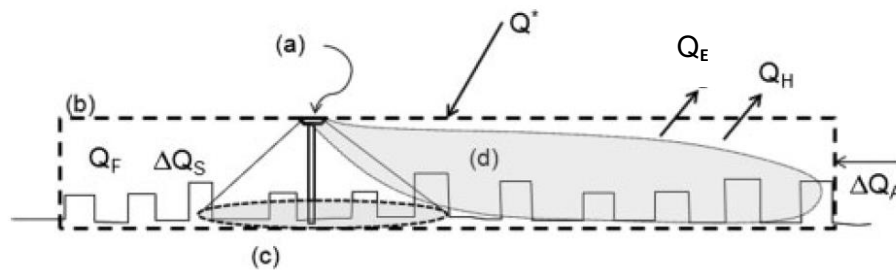
3.3. Metodologías Bottom-Up para el perfil de la contribución energética antropogénica

Además del empleo de la metodología de inventario, o metodología top-down, en la estimación del calor de origen antropogénico; se han utilizado otras metodologías que contrariamente al alcance mencionado permiten el manejo de información a mayor resolución.

3.3.1. Balance energético residual

Una de ellas es la medición directa del balance urbano de energía, esta medición posibilita la medición del calor de origen antropogénico en localidades seleccionadas dentro de una ciudad. Este método, en teoría, permite rastrear todos los flujos energéticos a través del volumen de control establecido (Figura 3-2).

Figura 3-2 Balance energético urbano en un volumen de control cercano a una torre micrometeorológica



- a) Volumen nominal de control
- b) Medición de radiación
- c) Flujo turbulento

Fuente: (Sailor, 2011, pág. 194)

En esta figura Q^* es la radiación neta, Q_E y Q_H son el calor latente y sensible que son transportados a través de la parte superior del volumen de control, ΔQ_A es el total de calor que se expulsa por advección desde los lados del volumen de control, ΔQ_S es el almacenamiento de energía termal dentro del volumen, y Q_F es el total de calor de origen antropogénico dentro del volumen de control. Desde el punto de vista micrometeorológico, se pueden utilizar radiómetro para conocer la radiación neta (Q^*), y técnicas de covarianza “eddy” para estimar las componentes de calor sensible y latente. Si la advección neta fuera del volumen de control se asume como insignificante y la energía total almacenada en el volumen de control se estima a través de las mediciones superficiales o se asume que es estacionario de un día a otro, el balance energético puede simplificarse y resolverse para Q_F de la siguiente manera:

$$Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A - Q^* \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Esta ecuación es aplicable para pequeños incrementos de tiempo (como 1 hora), si uno integra el balance energético en el periodo de 24 hr, el termino correspondiente a la energía almacenada se puede considerar pequeño e ignorarse (Sailor, 2011).

Un aspecto limitante, pero particularmente atractivo de este método es que inherentemente incluye el calor de origen antropogénico emitido de todas las fuentes. Este alcance ha sido aplicado en un relativo bajo número de investigaciones que han tenido distintos niveles de éxito. Como en Offerle, Grimmond y Fortuniak (2005), en donde

se aplicó este concepto a información obtenida en una localidad de la región de Lodz, Polonia. Esta información incluyó la temperatura superficial y mediciones de flujo de calor, mediciones de radiación neta, y un alcance de la covarianza “eddy” para estimar los flujos de calor sensible y latente.

El reto existente con el empleo del alcance de balance residual energético es que cualquier error dentro del sistema es incorporado en la estimación. Específicamente, debido a los cambios significativos por la utilización de los métodos de flujo turbulento en un sistema urbano no homogéneo, la magnitud de los errores en la estimación de las componentes de calor sensible y latente puede ser muy grande. Así mismo, como se ilustra en la Figura 3-3, el área de las fuentes de radiación medidas puede asumirse como circular centrada en la torre de instrumentos.

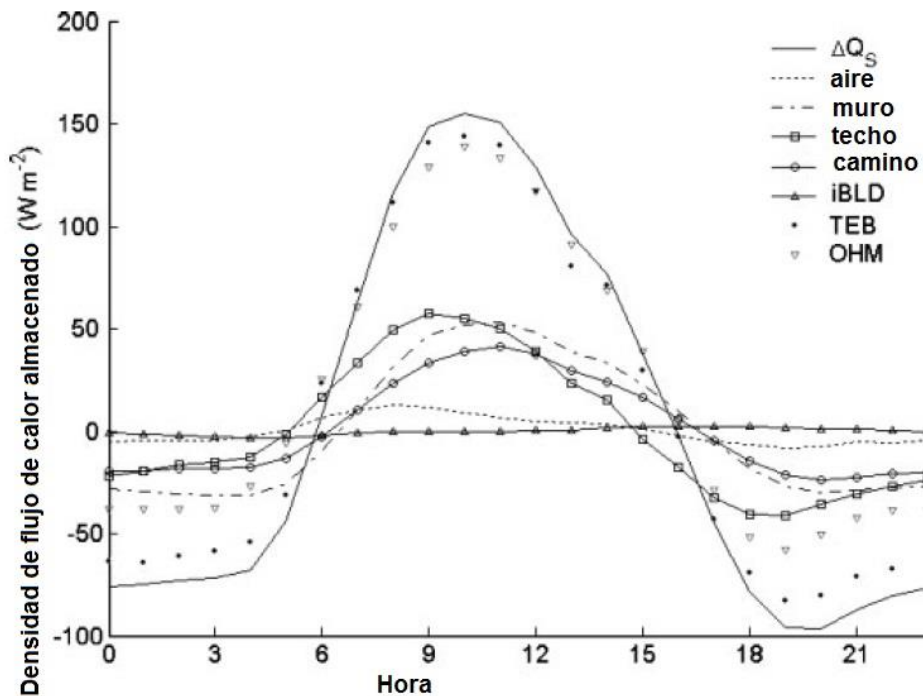
Las mediciones de flujo, sin embargo, esencialmente representan la huella de la fuente de área determinada por los flujos del viento y las características de dispersión. Como resultado, la fuente de área nominal para las mediciones de la radiación puede que no coincida o que sea similar a la fuente de área para las mediciones de flujo turbulento. Los supuestos con respecto al almacenamiento térmico y la advección agregan incertidumbre a las estimaciones. Por lo que no es de sorprender que las estimaciones de Offerle incluyan resultados no realistas, como números negativos para el calor de antropógeno en meses de verano. Sin embargo, las estimaciones durante el invierno son más consistentes con lo que se espera a partir de la metodología de inventarios magnitudes alrededor de 50 Wm^{-2} (Figura 3-3) (Offerle *et al.* 2005).

En un alcance contrastante, Kato y Yamaguchi (2005) emplean un balance de energía residual por medio de medición remota vía satélites junto con mediciones meteorológicas superficiales para la estimación del calor de origen antropogénico en Nagoya, Japón. Debido a la naturaleza de sus mediciones (radiación superficial), los resultados no permiten estimar a esta componente de calor directamente, y en lugar de ello permiten el incremento en el flujo superficial de calor sensible resultante del calentamiento antropogénico y el calentamiento asociado al aire superficial.

En el trabajo hecho por Pigeon *et al.* (2007) se tiene una de las más recientes y comprensibles estimaciones basada en el balance energético para las estimaciones de emisiones de calor antropógeno. Esta investigación se centra en Toulouse, Francia, como parte del experimento “CAPITOUL”. Este estudio incluyó la estimación de la componente

de calor antropógeno por medio de la metodología de inventario con similitudes con el de Sailor y Lu (2004) así como un balance de energía residual similar al de Offerle *et al.* (2005). Un aspecto particular de empleo de este estudio es el de comparación de los dos alcances. Se encontró que ambos alcances son concordantes en cuanto al calentamiento de origen antropogénico para el invierno, y que es a lo más de 70 Wm^{-2} y en verano los valores están cercanos a 15 Wm^{-2} .

Figura 3-3 Balance de energía media mensual por componentes y temperatura del aire para el año 2001



Nota: Los valores fueron determinados durante periodos de valides para todas las componentes, es decir, bajo condiciones atmosféricas favorables

iBLD: Masa interna de edificación/TEB: Balance Energético de la Ciudad/OHM: Histéresis del modelo

Fuente: (Offerle *et al.*, 2005, pág. 1414)

Así, otro empleo que pueden tener la estimación del calor sensible de origen antropógeno por medio de este alcance micrometeorológico es el de validación local de otros alcances, como el de inventarios. Las limitaciones clave de este alcance incluyen un alto nivel de incertidumbre asociada a algunos de los supuestos requeridos para deducir el calor antropógeno como residuo del balance energético. Más aún, estos alcances no pueden

diferenciar entre los términos de las diferentes fuentes y usualmente no producen de manera confiable perfiles horarios de liberación de calor.

Evaluando este enfoque debe mencionarse que un inconveniente es la incertidumbre asociada a la precisión de las mediciones individuales de los términos que comprenden los distintos flujos de calor. Además de que supone que todas las mediciones micrometeorológicas tienen huellas de flujo comparables. Aunque tal vez el más importante obstáculo, es que requiere de la colocación de una torre de flujos micrometeorológicos para cada locación en donde se requiera obtener información del calor antropogénico. Esta infraestructura es cara y para obtener información útil tendría que emplazarse a lo largo de todo un año o más. Su instalación en localidades no homogéneas, como en la mayoría de las zonas urbanas, invalida el supuesto necesario para la medición de flujos turbulentos, por lo que estas mediciones no pueden realizarse en zonas con edificios altos.

Se puede considerar que el aspecto más útil del enfoque de Balance Energético Residual es como una herramienta de validación de la estimación hecha por medio de otro enfoque.

3.3.2. Metodología de modelación del comportamiento térmico del sector de la edificación

Mientras que las metodologías de inventario y de balance de energía residual permiten la estimación de las emisiones de calor antropogénico de todas las fuentes en el medio urbano, el calor antropogénico a partir del sector de la edificación se refiere al calor que se genera por el uso de sistemas de aire acondicionado y calefacción, cocción, calentamiento de agua e iluminación. El modelo de balance de energía para ciudades (TEB, por sus siglas en inglés) de Masson (2000) fue un intento temprano de la modelación del calor antropogénico por edificios dentro de un ambiente urbano. Al momento que el TEB representa un importante avance con respecto a los modelos de los procesos turbulentos y balances energéticos en cañones urbanos, la representación que hacía de la componente de la edificación fue simplificada en gran medida. Trataba a los edificios como estructuras que envuelven y que a su vez sus propiedades conductivas determinan las necesidades de calefacción o aire acondicionado. Esta concepción es insuficiente ya que ignora un importante factor, que son las descargas al interior de la estructura que pueden inducir un incremento en el empleo del aire acondicionado.

También ignora el paso de radiación de onda corta que traspasa por las ventanas y que resulta en el calentamiento de espacios, esta contribución es significativa ya que las ventanas constituyen entre el 20 y 40% de la superficie de los muros. Sin embargo, el modelo ha seguido evolucionando y también se han hecho esfuerzos de validación para verificar su habilidad para representar de forma precisa un balance superficial de energía.

El estudio de Kikegawa *et al.* (2003) fue de los primeros que integraron una simulación del comportamiento energético de la edificación con un modelo meteorológico de la capa urbana. Este modelo, a diferencia del TEB, consideró la transferencia de radiación a través de las ventanas, el número de ocupantes, la tecnología de los sistemas de aire acondicionado. Gracias a este modelo fue posible dividir las contribuciones de calor de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) en las componentes de calor latente y sensible, y así tener estimaciones de calor antropogénico más realistas.

Con el estudio anterior se dio pie a otro realizado en Tokio en 2006 (Ohashi *et al.*, 2007) mediante el cual se encontró que el calor expulsado por los sistemas de aires en el verano resultó en la elevación de 1° o 2°C de la temperatura del aire, sin embargo este estudio ignoraba el calor proveniente de otras fuentes antropogénicas, como los vehículos o la industria. En otros estudios se han generado distintos prototipos acerca del comportamiento térmico de los edificios tanto comerciales como residenciales. Posteriormente estos modelos se asocian a información geográfica de acuerdo al uso de suelo. En el estudio de Sailor, Hart y Heiple (2008) para la ciudad de Houston, Texas, se utilizaron 30 prototipos que representaban al total de la edificación en la ciudad, y lograron estimar el consumo de energía a una resolución de 100 m. En otro estudio (Sailor *et al.*, 2007) se utilizó este enfoque para estimar el calor antropogénico sensible y las emisiones de vapor, además se complementó este estudio con el calor generado por el sector de transporte mediante el enfoque de inventario. Mediante este estudio se estimó que el calor desechado por los edificios puede superar entre 50% y 100% su consumo de energía. También se encontró que del 50% al 80% del calor emitido fue como calor latente.

Este método tiene como inconveniente que se requiere de la generación de prototipos para los edificios, sin embargo se debe notar que hay esfuerzos importantes para realizar una serie de prototipos, comenzando por el trabajo de Huang *et al.* (1991). y culminando con el desarrollo más reciente hecho por el Departamento de Energía de EE.UU. en cuanto a edificios comerciales de referencia, que consiste en la compilación de 16

prototipos en el mismo número de zonas climáticas. Es importante añadir que la modelación mediante este enfoque se utiliza una herramienta que requiere de información meteorológica. Las simulaciones en su mayoría obtuvieron información meteorológica que se registró a lo largo de un año y de la estación en el aeropuerto más cercano.

El enfoque de modelación térmica del sector de edificación permite corregir problemas asociados con el de inventarios. Permite realizar perfiles temporales de la ocupación, uso de energía, cargas ambientales, uso de sistemas de calefacción y aire acondicionado. También permite la representación tanto de las emisiones de calor antropogénico como de vapor. Su utilidad se incrementa cuando se realiza para distintos prototipos asociados con una base de datos relacionada con un sistema de información geográfica. Pero para una mayor utilidad debe estar ligado con la estimación de las emisiones del sector transporte e industria mediante el enfoque de inventario. A pesar de que existen diferentes modelos sobre el tráfico vehicular para la estimación de emisiones contaminantes, éstos aún no han sido empleados al problema de estimación de emisiones antropógenas de calor y de vapor para el sector de transporte.

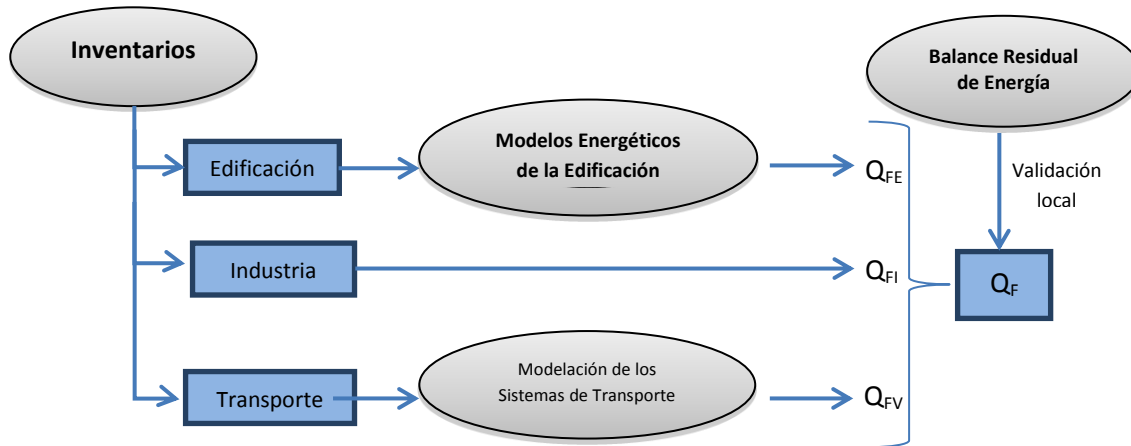
3.3.3. Modelación de los diferentes sectores

Una propuesta de uso de los diferentes enfoques de manera conjunta, sería utilizar el enfoque de calor residual a modo de verificación, contemplando el cálculo con el enfoque de inventarios para el sector de edificaciones, industrial, transporte (Figura 3-4), y agregar la contribución por el metabolismo humano.

3.1. Estimación de la contribución antropogénica energética mediante metodologías Bottom-Up y Top-Down

Las distintas subcomponentes de la contribución antropogénica al balance energético, de la ecuación 2.7 no pueden ser medidas directamente, para conocer su aportación por separado

Figura 3-4 Empleo de los enfoques de inventario en conjunto con la modelación energética para llegar a una estimación integral de las emisiones de calor latente y sensible de origen antropogénico, que pueden ser validadas utilizando mediciones locales micrometeorológicas



Fuente: (Sailor, 2011, p. 197)

se pueden utilizar modelos como el propuesto por Grimmond (1992) (Ver Estes *et al.*, 2005). En éste la modelación del consumo del sector transporte requiere de información detallada de la actividad vehicular, como número de vehículo y la energía utilizada por unidad. El sector de edificación, que comprende el sector residencial, institucional e industrial; considera información más agregada, como el consumo medio de combustibles y energía. En el caso del metabolismo, además del metabolismo humano se considera el de los animales domésticos (perros o gatos), y se modela a partir del número de éstos y de algunos parámetros de la intensidad de la actividad (Tabla 3-2).

El modelo bottom-up para transporte de Grimmond es retomado por Smith, Lindley y Levermore (2009), pero se desarrolla a partir de información espacial más detallada ya que se cuenta con una clasificación para uso de suelo con 29 tipos de morfología urbana, como aeropuertos, escuelas, industria, etc. Así, para el sector de edificación ya que el uso de suelo está definido, se categoriza de manera rápida de acuerdo a su localización. El consumo de energía por edificación está disponible a nivel local, por lo que se obtiene un consumo típico por tipo de edificación (Tabla 3-3).

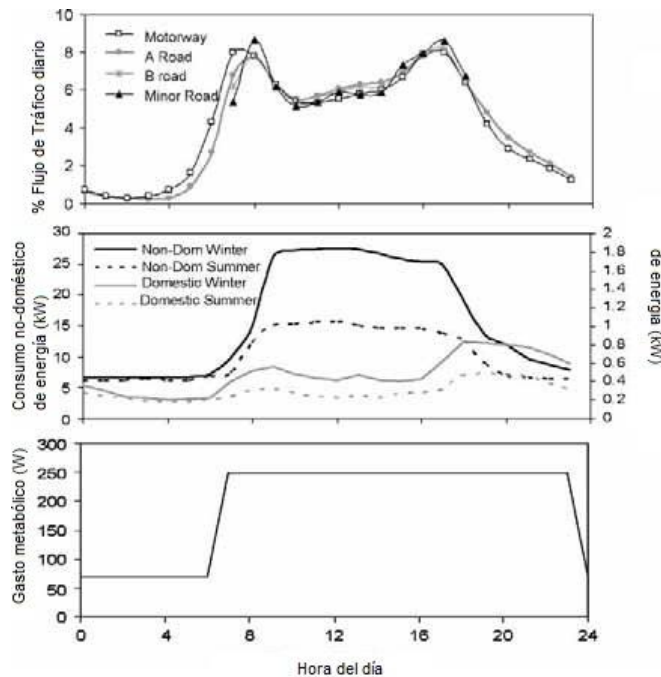
Tabla 3-2 Ecuaciones para la estimación de las subcomponentes del flujo de calor antropogénico

| Subcompo nente | Ecuación | Simbología | |
|---|---|--|--|
| Q_{FV} Calor por el transporte | $Q_{FV} = \frac{[(\eta_{Vi}(t)D_{Vi})EV]}{[Ax3600]}$ $EV = \frac{(NHC_j \rho_j WFS_j)}{FE}$ | A : El área de estudio (m ²) i : Tipo de camino (mayor o menor) η_{Vi} : Número de | t : Tiempo (h) j : Tipo de combustible NHC _j : Calor neto de combustión (J kg ⁻¹) |
| Q_{FS} Calor debido a la edificación | $Q_{FS} = [(GE_E(t)\Sigma(n_{Ei}C_{Ei})) + ((GR_G(t)\Sigma(n_{Gi}C_{Gi})GEF)/3600)]/A$ | | |
| | $GR(t) = gr(t)/\Sigma gr(t)$ | n : Número de consumidores C : Consumo medio por consumidor GEF : Eficiencia del gas (0.675) (electricidad=1.00) | i : Clase GR(t) : Consumo de la red $\Sigma gr(t)$: Consumo total de la red durante el periodo de estudio E, G : Electricidad (W), gas (J) |
| Q_{FM} Calor por el metabolismo humano | $Q_{FM} = [nM(t)]/A$ | M : Tasa de metabolismo (W) | n : Número de personas y animales |

Fuente: (Grimmond, 1992)

La contribución por el metabolismo humano utiliza el censo de población se toma el propuesto por Oke (1987), que asigna el valor de 70 W por persona en el periodo de menor actividad hasta 800 para la actividad vigorosa (Figura 3-5).

Figura 3-5 Perfiles correspondientes a a) Flujo del tráfico, b) Consumo energético doméstico y no-doméstico y c) tasa metabólica humana



Fuente: (Smith, Lindley, y Levermore, 2009, pág. 5)

Tabla 3-3 Ecuaciones para la estimación de las componentes del flujo de calor antropogénico

| Subcom- ponente | Ecuación | Simbología |
|--|---|--|
| Q_{FV} Calor por el transporte | $Q_{FV}(t) = \sum \frac{[(\eta_{mri}(t)L_{ri})EF_{mr}]}{A_i} (Wm^{-2})$ | <p>A : El área de estudio (m^2)</p> <p>η_{mri}: Número de vehículos por tipo m en el camino r y en la celda i</p> <p>L_{ri}: La longitud del camino r en la celda i</p> <p>EF_{mr}: Es un factor de emisión de calor que resulta del consumo de Energía de acuerdo a la velocidad por tipo de vehículo m</p> <p>t: Tiempo (h)</p> |
| Q_{FS} Calor debido a la edificación | $Q_{FBI}(t) = \frac{\sum(A_{UMT}Blt_{UMT}EC_{UMT})}{A_i}$ | <p>UMT: Se refiere a los tipos de morfología urbana</p> <p>A_{UMT}: Área cubierta por cada edificación</p> <p>Blt_{UMT}: Proporción del área cubierta por cada edificio</p> <p>EC_{UMT}: Energía consumida por cada edificación (electricidad y combustibles)</p> |
| Q_{FM} Calor por el metabolism o humano | $Q_{FMI}(t) = \frac{[POP_I Q_M(t)]}{A_i}$ | <p>POP_I: Población en la celda i</p> <p>Q_M: Tasa de metabolismo humano (W)</p> |

Fuente: (Smith, Lindley, y Levermore, 2009)

- a) Donde Q_{FV} depende del tipo y cantidad de gasolina o diésel empleados, del número de vehículos (η_V) que viajan dentro del área de estudio, la distancia que viajan, y de su eficiencia energética (distancia viajada por unidad de combustible).
- b) Para Q_{FI} y Q_{FE} , se toman en cuenta el uso de electricidad, gas L.P.; gas natural o combustóleo (Smith, Lindley, y Levermore, 2009). Se clasifican las edificaciones tanto de uso residencial como comercial, industrial o institucional, que a su vez se subdividen. Se consideran los consumos eléctricos de cada edificación de acuerdo a la facturación mensual que no indica la variación horaria, pero que se toma de la fluctuación horaria que tiene la demanda de la red eléctrica o de gas
- c) Para el cálculo de Q_{FM} que es calor generado por el metabolismo humano, el día se subdivide en dos periodos: “activo” de 7 a 23 hr y “pasivo” de 23 a 7 hr. El número de animales se puede asumir como un 10% de la población humana y con un metabolismo cercano al 25% del de la gente.

También, son importantes otras consideraciones para estimar el efecto de Q_F en la temperatura superficial. La media máxima horaria tanto para las contribuciones del metabolismo y por fuentes estacionarias es calculada en un periodo de tiempo (en unidades de joule) para un individuo promedio. La suma de las contribuciones se reduce un 30% debido a las pérdidas por fugas de aire en edificios. El área superficial ocupada por los edificios se calcula para determinar la densidad media del flujo de calor perdido por el interior de los edificios.

4. PLANTEAMIENTO

El calor antropogénico proviene de numerosas fuentes, como pueden ser edificios, industria, transporte o hasta del metabolismo humano. Para determinar cuánto calor antropogénico se produce en cualquier región, los usos energéticos como la combustión de combustibles o de la energía eléctrica por las distintas fuentes (edificación, industrial y transporte) deben ser tomados en cuenta; así como la contribución humana debido al calor metabólico, la contribución de esta última componente suele ser pequeña, de alrededor del 2%, por lo que normalmente se desprecia. Los flujos de calor de cada fuente se obtienen en una distribución horaria y se expresa en watts (W), y la suma de sus contribuciones es dividida entre el área de la zona de estudio, generalmente dada en metros cuadrados (m^2). Con esta razón se obtiene el flujo energético por unidad de área, cantidad que se expresa en watts (W) por metro cuadrado (m^2) para su integración con las demás componentes del balance superficial energético.

Las emisiones antropogénicas de calor consideradas en el presente trabajo serán las que se generan dentro de los límites urbanos de la Ciudad de México, que contempla al Distrito Federal y área conurbada del Estado de México. Las áreas con uso de suelo distinto al urbano serán discriminadas, ya que su contribución al calor antropogénico es muy baja o nula en ciertos casos, como en el caso de las áreas de conservación, o de uso agrícola y forestal que son un porcentaje significativo dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que es donde se localiza la Cd. De México.

4.1. Características geográficas de la Ciudad de México, región de estudio

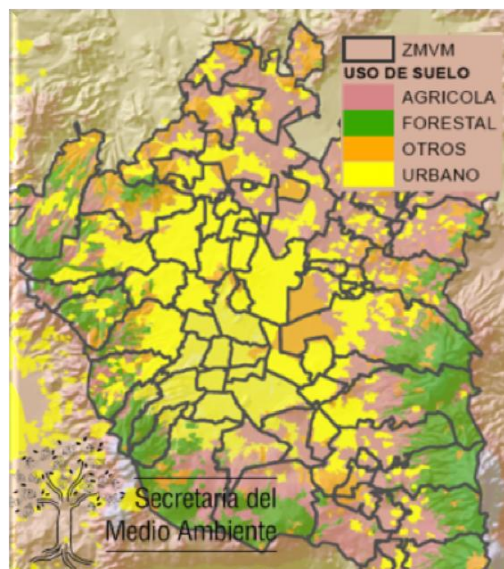
La región geográfica en donde se ubica la Ciudad de México se localiza en la región central de la República Mexicana, a una altura promedio de 2,240 msnm; forma parte de una cuenca cerrada de 9,560 km^2 de superficie, denominada Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que abarca casi en su totalidad al Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México⁴ (Figura 4-2). Se encuentra rodeada por una cadena montañosa formada por las sierras del Ajusco, Chichinautzin, Nevada, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina. Esta cadena montañosa alcanza su nivel más alto hacia el sur, con 3,952 msnm, mientras que en el norte la altura máxima es de 3,000 msnm. Debido a esta altura,

⁴ Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010, Secretaría de Desarrollo Social-Consejo Nacional de la Población-Instituto Nacional de Estadística y Geografía; México, 2012.

el contenido de oxígeno del aire de la ZMVM es aproximadamente 23% menor que al nivel del mar, lo que contribuye a que los sistemas de combustión interna sean menos eficientes y emitan una mayor cantidad de contaminantes. Por otro lado, la cadena montañosa que la rodea impide una adecuada dispersión de contaminantes propiciando su estancamiento (SMA, 2012).

Aunado a esto, su latitud de 19° N ocasiona que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos, así mismo, su ubicación en el centro del país permite que a lo largo del año resulte afectada por sistemas anticiclónicos, lo que provoca viento débil en superficie y cielo despejado, a causa de la estabilidad atmosférica, con la consecuente dificultad para la dispersión de contaminantes (SMA, 2000).

Figura 4-1 Uso de suelo en la ZMVM, 2010



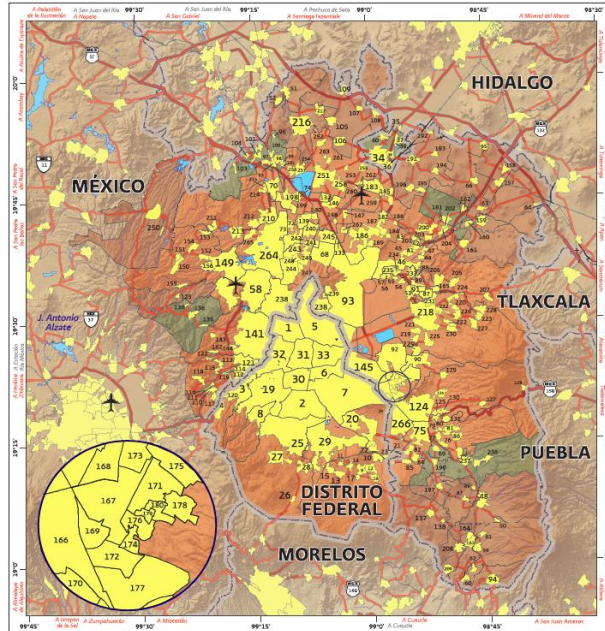
Fuente: (SMA, 2012, pág. 16)

En el 2010 la población de la ZMVM era de 20.1 millones de habitantes, con una superficie de 7,866.1 kilómetros cuadrados, lo cual derivó en una densidad media urbana de 160.1 habitantes por hectárea (SEDESOL, 2012).

De la superficie denominada como Cd. De México no toda corresponde a una superficie urbana; por ejemplo en el Distrito Federal existe un área extensa de suelo de conservación (Figura 4-1). Para estimar la superficie urbana se utilizaron los datos reportados por el INEGI sobre uso de suelo y vegetación en el 2010 de cada uno de los

municipios que la integran. Así mismo, los municipios que se considerarán en el área de estudio, definida como Ciudad de México, son aquellos que cumplen con el criterio de conurbación física para la definición de las Zonas Metropolitanas de México, entre los que están los 16 municipios del Distrito Federal y 35 del Estado de México (SEDESOL, 2012).

Figura 4-2 Zona Metropolitana del valle de México



Nota: En color amarillo se están los municipios considerados dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México en el 2010. Para definir la Cd. De México se consideraron los 16 municipios del Distrito Federal y 35 del Estado de México que cumplen con el criterio de conurbación física (SEDESOL, 2012).

Fuente: (INEGI, 2012, pág. 70)

Tabla 4-1 Uso de suelo de la ZMVM, 2010

| Uso de suelo | D.F. | Edo. De México* | Cd. De México | D.F. | Edo. De México* | Cd. De México |
|--------------|-----------------|-----------------|---------------|------|-----------------|---------------|
| | km ² | | | % | | |
| Superficie | 1,486 | 3,579 | 5,065 | | | |
| Agricultura | 372 | 1,537 | 1,909 | 25 | 43 | 38 |
| Pastizal | 94 | 522 | 616 | 6 | 15 | 12 |
| Bosque | 172 | 492 | 664 | 12 | 14 | 13 |
| Matorral | 7 | 56 | 63 | 0 | 2 | 1 |
| Otros tipos | - | 26 | 26 | - | 1 | 1 |
| Vegetación | 245 | 210 | 454 | 16 | 6 | 9 |
| Áreas sin | 1 | 72 | 73 | 0 | 2 | 1 |
| Cuerpos | 2 | 24 | 27 | 0 | 1 | 1 |
| Áreas | 592 | 638 | 1,230 | 40 | 18 | 24 |

Nota: *Incluye 35 municipios conurbados.

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, 2012.

4.2. Modelación de las fuentes antropogénicas generadoras de calor

Para las componentes de edificación, que considera a la edificación industrial, comercial y residencial; y la del metabolismo humano se utiliza el método de inventarios. En el caso del transporte su modelación se realiza a partir de información generada para otros modelos del mismo sector para la Ciudad de México.

4.2.1. Perfil horario de los procesos de combustión por fuentes antropogénicas

La cuantificación de las componentes de la contribución antropogénica, de acuerdo a la Tabla 3-3, requiere de información detallada, ya que se derivan de una metodología con enfoque bottom-up. Así, para la componente vehicular se requiere conocer el consumo de combustible por tipo de vehículo, por hora del día y por región (celda). En el caso de la componente de edificación su consumo energético se modela de acuerdo al tipo de edificación y su localización.

Para la Ciudad de México no se cuenta con información con ese detalle, y para la estimación de la contribución horaria de las distintas componentes que involucran procesos de combustión se propone considerar las emisiones de monóxido de carbono (CO) en la Zona Metropolitana del Valle de México en el año 2010 por fuentes móviles y puntuales, para obtener el consumo de energía y la distribución horaria en el caso del transporte y la distribución horaria del consumo de la industria. En el caso de los sectores de comercio, servicios y residencial, se consideran las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) para las fuentes de área y su distribución horaria.

En los procesos de combustión, además de la generación de calor sensible o latente, se generan emisiones de distintos gases, como son: vapor de agua, el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), bióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀). La emisión de estos compuestos depende de diversos factores, en condiciones de una mezcla pobre aire/combustible, se generan mayores cantidades de emisiones PM₁₀, CO y HC; para el caso de las emisiones de SO₂ estas dependen de la concentración de azufre del combustible: y las emisiones de NO_x dependen principalmente del tiempo de exposición a altas temperaturas en la cámara de combustión, concentración de oxígeno, tamaño y diseño de los equipos de combustión como el contenido de azufre, pero principalmente de la tecnología que se emplee para la combustión (tipo de quemadores y sistemas de

control) (Smith, Lindley, y Levermore, 2009). Las emisiones de COV resultan de la combustión ineficiente en quemadores, por ejemplo estufas o calentadores de agua.

En los últimos 10 años se han recopilado varios inventarios de emisiones desagregadas por hora y por malla geográfica para apoyar estudios de modelación de la calidad del aire en México. Por ejemplo, la base de datos de inventarios de emisiones tóxicas para Ambos Nogales fue recopilada para apoyar evaluaciones de riesgos a la salud a lo largo de la frontera México-Estados Unidos (Castillejos, 2005).

Subproductos de los procesos de combustión

El monóxido de carbono es un producto intermedio del proceso de combustión. El mecanismo de formación del CO está directamente influenciado por los mecanismos de empleo, tipo y tamaño de la tecnología empleada, antigüedad, mantenimiento y operación. Las tasas de emisión pueden variar por varios órdenes de magnitud para instalaciones que son operadas inapropiadamente o con poco mantenimiento, tal puede ser el caso de las unidades más viejas.

El tamaño y antigüedad de la unidad puede indicar que en las unidades más viejas y pequeñas, la combustión es menos controlada y por ello las emisiones tienden a ser mayores que para las plantas más nuevas.

Las emisiones de CO a partir de fuentes móviles son función de la eficiencia de combustión y controles de emisión posteriores a la combustión (Ver anexo 1). Las emisiones son mayores cuando la mezcla aire-combustible es rica, con menos oxígeno que el requerido para una combustión completa. Esto ocurre especialmente a baja velocidad y condiciones de arranque en frío en motores de ignición.

La mayoría de las emisiones de monóxido de carbono debidas a la combustión de combustibles provienen de los vehículos motorizados. Otra fuente importante es el sector residencial que cuentan con pequeños equipos de combustión.

El CO es un producto de la combustión de los hidrocarburos utilizados como combustible y el 98% es generado por la combustión interna en los vehículos (Tabla 4-3), la distribución que siguen las emisiones está relacionada con la actividad de los mismos, en donde cabe destacar a los autos particulares, los vehículos mayores de tres toneladas y a los microbuses por su gran actividad. Con base en lo anterior, se puede mencionar que el CO sigue una distribución conforme a las principales calles y avenidas de mayor tránsito

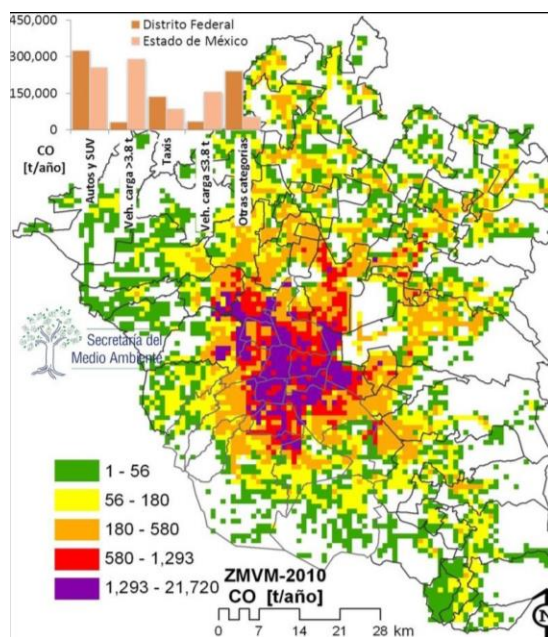
vehicular. Teniendo así, que las mayores emisiones se localizan en las delegaciones del centro de la ZMVM como son Benito Juárez, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, disminuyendo la emisión conforme se avanza hacia los extremos de la ZMVM (Figura 4-3 y 4-4) (SMA, 2012).

Tabla 4-2 Emisiones promedio horarias de la ZMVM, 2010

| Hora | Emisiones [t/h] | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------------|-------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|------------|------------------|-------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NO _x | COV | Hora | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NO _x | COV |
| 00:00 | 0.5 | 0.2 | 1 | 5 | 7.6 | 31.4 | 13:00 | 7.4 | 1.8 | 3 | 348.9 | 393.1 | 517.9 |
| 01:00 | 0.6 | 0.2 | 1 | 8.4 | 11.4 | 35.9 | 14:00 | 7.6 | 1.9 | 3 | 366.5 | 412.5 | 540.2 |
| 02:00 | 0.6 | 0.2 | 1 | 8.8 | 11.8 | 36.3 | 15:00 | 6.4 | 1.6 | 2.7 | 277.1 | 313.6 | 421.4 |
| 03:00 | 0.6 | 0.2 | 1 | 9.7 | 12.8 | 38 | 16:00 | 5.6 | 1.4 | 2.5 | 232.6 | 264.4 | 351.1 |
| 04:00 | 1 | 0.3 | 1.3 | 43.2 | 49.9 | 83 | 17:00 | 5.8 | 1.5 | 2.5 | 253 | 286.8 | 372.5 |
| 05:00 | 2.5 | 0.8 | 1.8 | 171 | 191.1 | 243 | 18:00 | 6.2 | 1.5 | 2.5 | 376.3 | 418.5 | 511.6 |
| 06:00 | 5.6 | 1.6 | 2.7 | 436.1 | 483.9 | 571 | 19:00 | 4.8 | 1.1 | 2.1 | 251.4 | 280.5 | 354.2 |
| 07:00 | 7.3 | 2 | 3.3 | 541.7 | 601 | 714.5 | 20:00 | 4.3 | 1 | 1.9 | 222.3 | 248.2 | 315 |
| 08:00 | 6.8 | 1.9 | 3.3 | 384.9 | 432.5 | 549.3 | 21:00 | 2.8 | 0.7 | 1.6 | 150.6 | 168.7 | 216 |
| 09:00 | 5.9 | 1.6 | 2.9 | 257.6 | 292.1 | 401.2 | 22:00 | 1.6 | 0.4 | 1.3 | 84.5 | 95.5 | 133.1 |
| 10:00 | 5.8 | 1.4 | 2.7 | 209.7 | 239.4 | 344.3 | 23:00 | 0.8 | 0.2 | 1.1 | 27.9 | 32.9 | 61.2 |
| 11:00 | 5.6 | 1.4 | 2.6 | 189.4 | 217 | 321.3 | Total /día | 103 | 27 | 52 | 5,132 | 5,778 | 7,592 |
| 12:00 | 6.6 | 1.6 | 2.9 | 275.8 | 312.4 | 428.2 | | | | | | | |

Fuente: (SMA, 2012)

Figura 4-3 Distribución espacial de las emisiones de monóxido de carbono en la ZMVM, 2010



Fuente: (SMA, 2012, pág. 31)

Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)

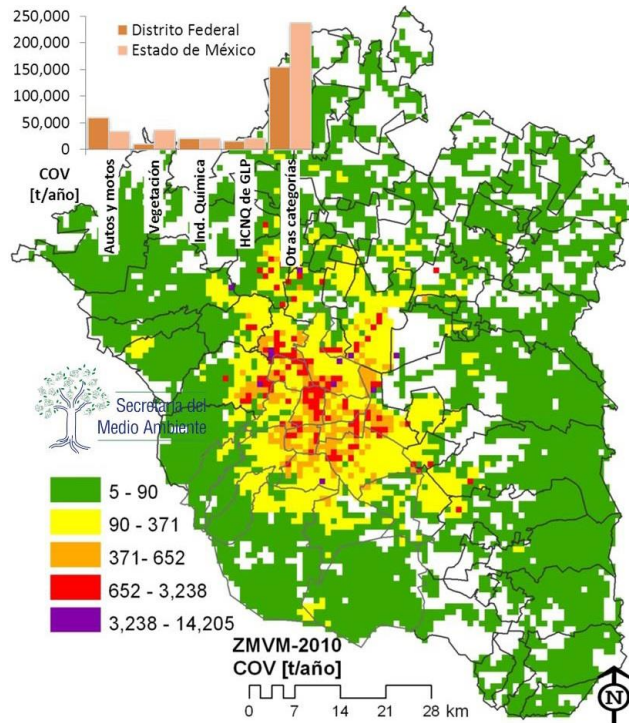
Las principales fuentes generadoras de compuestos orgánicos volátiles (COV) son: las fuentes móviles, la industria y el sector residencial (Tabla 4-3). Estas emisiones son resultado de los hidrocarburos no quemados de gas licuado de petróleo provenientes principalmente de la combustión ineficiente de estufas y calentadores de agua. El uso de solventes también genera COV en grandes cantidades y se usan principalmente en el comercio o la industria. Por ejemplo, la industria del papel contribuye con el 62% (Tabla 4-4) de los compuestos orgánicos generados en la industria, ya que utiliza gran cantidad de solventes en sus procesos. Debido a esto, la distribución geográfica de las emisiones no solo depende de la actividad vehicular e industrial, sino también de la densidad de población por sus actividades cotidianas y la presencia de vegetación de la zona. (SMA, 2012).

Tabla 4-3 Inventario de emisiones de la ZMVM, 2010

| Sector/categoría | Emisiones [t/año] | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | PM₁₀ | PM_{2.5} | SO₂ | CO | NO_x | COT | COV | NH₃ |
| Industrial | 5,721 | 1,219 | 7,423 | 6,324 | 13,953 | 169,514 | 150,933 | 145 |
| Fuentes móviles | 3,720 | 2,769 | 411 | 1,587,662 | 169,005 | 200,010 | 188,414 | 4,448 |
| Servicios y comercios | 349 | 298 | 245 | 11,441 | 5,878 | 44,593 | 35,557 | N/S |
| Habitacional | 905 | 880 | 19 | 4,427 | 4,274 | 203,913 | 164,747 | 30,237 |
| Construcción | 845 | 607 | N/S | 4,767 | 12,001 | 1,441 | 1,381 | N/S |
| Agrícola | 2,300 | 652 | 8 | 1,746 | 4,683 | 529 | 491 | 2,182 |
| Ganadero | 112 | 13 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 4,824 |
| Disposición de | N/A | N/A | N/A | 153 | N/A | 330,557 | 16,090 | N/E |
| Vialidades sin/con | 17,046 | 2,615 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| Incendios | 97 | 86 | 9 | 992 | 32 | 78 | 42 | 9 |
| Vegetación | N/A | N/A | N/A | N/A | 5,026 | 44,774 | 44,774 | N/A |
| Erosión eólica del | 511 | 108 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| Total | 31,606 | 9,247 | 8,115 | 1,617,512 | 214,852 | 995,409 | 602,429 | 41,845 |

Fuente: (SMA, 2012, pág. 20)

Figura 4-4 Distribución espacial de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la ZMVM, 2010



Fuente: (SMA, 2012, pág. 32)

Tabla 4-4 Contribución por fuente al Inventario de emisiones de la ZMVM, 2010

| Sector/categoría | Participación porcentual (%) | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------|-----------------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NO _x | COT | COV | NH ₃ |
| Industrial | 18.1 | 13.2 | 91.5 | 0.4 | 6.5 | 17.0 | 25.1 | 0.3 |
| Fuentes móviles | 11.8 | 29.9 | 5.1 | 98.2 | 78.7 | 20.1 | 31.3 | 10.6 |
| Servicios y comercios | 1.1 | 3.2 | 3.0 | 0.7 | 2.7 | 4.5 | 5.9 | - |
| Habitacional | 2.9 | 9.5 | 0.2 | 0.3 | 2.0 | 20.5 | 27.3 | 72.3 |
| Construcción | 2.7 | 6.6 | - | 0.3 | 5.6 | 0.1 | 0.2 | - |
| Agrícola | 7.3 | 7.1 | 0.1 | 0.1 | 2.2 | 0.1 | 0.1 | 5.2 |
| Ganadero | 0.4 | 0.1 | - | - | - | - | - | 11.5 |
| Disposición de | - | - | - | 0.0 | - | 33.2 | 2.7 | - |
| Vialidades sin/con | 53.9 | 28.3 | - | - | - | - | - | - |
| Incendios | 0.3 | 0.9 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vegetación | - | - | - | - | 2.3 | 4.5 | 7.4 | - |
| Erosión eólica del | 1.6 | 1.2 | - | - | - | - | - | - |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fuente: (SMA, 2012, pág. 20)

Perfiles horarios de las emisiones de contaminantes por fuentes antropogénicas

Los inventarios de emisiones se pueden emplear como instrumento para la adecuada gestión de la calidad del aire, que permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes, así mismo el tipo y cantidad de contaminantes que aporta.

La metodología seguida en este caso para el inventario de emisiones es mediante la modelación del comportamiento de las fuentes que intervienen en las distintas emisiones.

Las fuentes de los inventarios se clasifican en:

- Fuentes puntuales (industria)
- Fuentes móviles (vehículos automotores que circulan por calles y carreteras), y
- Fuentes de área (comercios, servicios, casas habitación y vehículos automotores que no circular por carreteras), y
- Fuentes naturales (erosión de suelo y emisiones biogénicas, entre otras).

Las emisiones que contempla un inventario están en concordancia con la finalidad de dicho inventario. Por ejemplo:

- a) Cuando se busca conocer el origen de la mala calidad del aire en una zona urbana, se hace un inventario de contaminantes criterio, que puede incluir monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), partículas (menores a 10 micrómetros -PM₁₀- y menores a 2.5 micrómetros -PM_{2.5}-), compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos (HC), y plomo (Pb).
- b) Si lo que se quiere es conocer el origen de las emisiones que causan el cambio climático global, se hace un inventario de gases de efecto invernadero (GEI), que puede incluir el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), entre otros.⁵

Un inventario de emisiones juega un papel clave en los modelos de calidad del aire al proporcionar la siguiente información:

- Tipos de fuentes
- Tipos de contaminantes

5

<http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Paginas/InventarioNacionaldeEmisiones.aspx>

- Tasas de emisión
- Distribución temporal de las emisiones
- Ubicación de las fuentes
- Alturas de las chimeneas y otros puntos de emisiones;
- Proyecciones futuras de emisiones.

El Inventario Nacional de Emisiones de México se actualiza cada tres años, el primero que se realizó fue para 1999, éste contiene contaminantes criterio⁶ y precursores. Otras entidades, como las estatales y municipales, también realizan inventarios de emisiones a la atmósfera que además de los gases criterio pueden incluir otros gases, como los de efecto invernadero u otros.

El primer inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se realizó para el año 1998, contiene para cada contaminante criterio el porcentaje que se le atribuye a cada tipo de fuente reportada de manera agregada tanto geográfica como temporalmente, por lo que no muestra el perfil horario de las emisiones de los distintos gases. Este inventario se realiza con una periodicidad de dos años, siguiendo las metodologías del Programa de Inventarios de Emisiones para México⁷.

El primer inventario de la ZMVM en donde se obtuvo la distribución horaria de las emisiones fue el del 2000, que presentó la distribución agregando todas las fuentes. El inventario de emisiones de la ZMVM 2010 presenta la distribución horaria de las emisiones por tipo de fuente, lo que permite conocer cómo se generan los contaminantes en cada hora del día, esta distribución representa un panorama de intensidad con la que varían las emisiones a lo largo de 24 horas y por lo tanto las actividades que se desarrollan en la ZMVM, por ser la generación de los contaminantes afín a los horarios de actividad de la población. El perfil horario de las emisiones por fuentes móviles muestra una influencia de los contaminantes vehiculares, como consecuencia de la satisfacción de necesidades de movilización de la población (SMA, 2012).

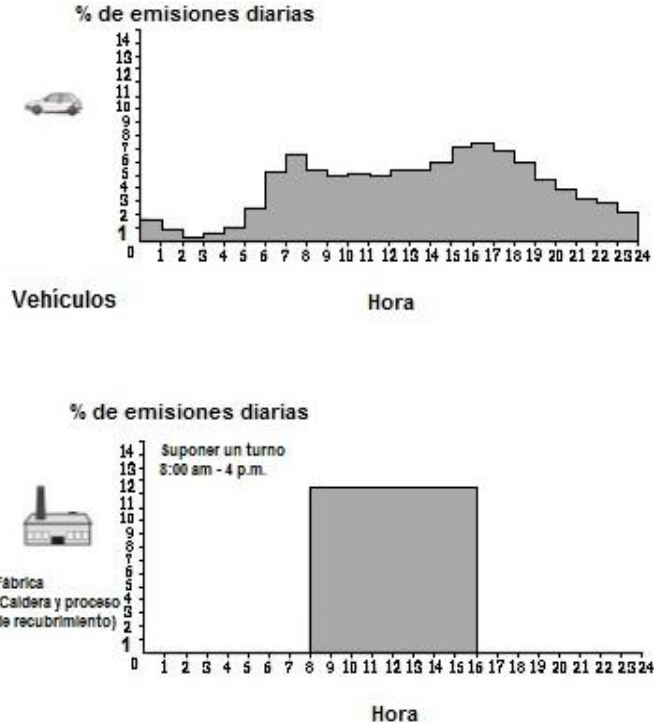
⁶ A los contaminantes criterio se les llamó así porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Los contaminantes criterio son: Bióxido de azufre (SO₂), bióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM), plomo (Pb), monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃).

⁷

http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Inventarios/MANUALES_Programa%20de%20inventarios%20de%20emisiones%20para%20México_Manuales%20y%20reportes.PDF

Las emisiones pueden distribuirse temporalmente por estación, semana, día u hora. Este último es el desglose de las emisiones diarias (promedio de días hábiles, sábados y domingos), por hora. En general todas las fuentes exceptuando algunos establecimientos industriales que pueden operar al mismo ritmo a las 24 horas del día, presentan fluctuaciones a lo largo del día. Como las emisiones por vehículos automotores, típicamente tendrán valores pico diferentes durante los traslados matutino y vespertino, pero caerán a niveles muy bajos durante la madrugada (1 a 6 am). Las emisiones de algunos establecimientos industriales están limitadas a un turno de ocho horas. Los perfiles de distribución por hora para estos dos ejemplos se muestran en las Figuras 4-5 e indican la fracción de las emisiones diarias que ocurren cada hora. El cálculo de la distribución horaria de las emisiones se realiza a partir de mediciones de la concentración horaria de un contaminante en la atmósfera. Cuando no se dispone de estas mediciones las emisiones pueden estimarse mediante factores de emisión del combustible para cada subproducto de la combustión. El factor F es la relación del volumen gaseoso de los productos de combustión con el contenido de calor del combustible e incluye todos los componentes de la combustión excepto el agua (INE, 2005).

Figura 4-5 Ejemplo de los perfiles de distribución temporal por hora correspondientes a dos fuentes de emisiones de una comunidad hipotética



Fuente: (INE, 2005, pág. 243)

En la determinación de la distribución temporal por fuente existen algunos aspectos a ser considerados. Las herramientas de modelación asignan perfiles temporales a fuentes como las puntuales, definido por el proceso involucrado, cuando no existe este nivel de detalle los perfiles temporales se asignan a un nivel menos refinado. Los horarios reales de operación deben conocerse y pueden ser obtenidos a través de encuestas, que deben ser diferentes entre semana y fines de semana (INE, 2005).

Las distintas categorías dentro de las fuentes de área tienen perfiles temporales que las herramientas de modelación de emisión asignan por omisión. Sin embargo, la distribución temporal de los procesos de emisión puede variar para cada región. Por ello es importante evaluar si los perfiles horarios toman en cuenta estas condiciones y determinar si son adecuados para los objetivos de un inventario de emisiones para modelación.

En cuanto a las fuentes móviles, los vehículos automotores en general presentan variaciones temporales considerables. La distancia recorrida varía significativamente de una estación a otra, o de un mes a otro. Además, dependiendo de la región del inventario, los patrones de recorrido en los días de los días hábiles pueden ser distintos a los de fin de semana o días feriados. Por ello es indispensable que un perfil horario refleje con precisión la actividad vehicular real para los periodos de tiempo de interés específicos (INE, 2005).

Para el inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México se realiza la caracterización de la flota vehicular y se modelan los recorridos diarios promedio por tipo-modelo de vehículo (Tablas 4-5 y 4-6). Con esta información se alimenta un modelo (Anexo 1) y se obtienen la actividad horaria vehicular y las emisiones horarias.

Tabla 4-5 Parque vehicular por año modelo de la ZMVM, 2010

| Año Modelo | Número de vehículos por tipo | | | | | | | | | | | | Total |
|--------------|------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|------------|------------------|
| | AP | TAX | SUV | COM | MIC | PU | V ≤ 3.8t | TRA | AUT | V > 3.8t | MC | Metrobús | |
| 1986 y ant. | 194,584 | 1,082 | 28,229 | 2,355 | 527 | 54,538 | 1,917 | 22,311 | 3,808 | 31,916 | 9,805 | N/A | 351,072 |
| 1987 | 15,909 | 171 | 3,729 | 495 | 50 | 6,851 | 165 | 947 | 182 | 1,229 | 1,681 | N/A | 31,409 |
| 1988 | 24,549 | 236 | 4,313 | 458 | 133 | 11,223 | 117 | 1,128 | 210 | 1,939 | 2,192 | N/A | 46,498 |
| 1989 | 38,082 | 298 | 6,217 | 428 | 611 | 13,654 | 261 | 1,463 | 347 | 3,107 | 3,531 | N/A | 67,999 |
| 1990 | 52,888 | 544 | 7,406 | 1,031 | 3,166 | 14,399 | 415 | 1,435 | 631 | 4,352 | 3,833 | N/A | 90,100 |
| 1991 | 62,634 | 1,076 | 11,314 | 1,175 | 7,448 | 17,621 | 384 | 1,949 | 1,253 | 6,442 | 2,553 | N/A | 113,849 |
| 1992 | 73,522 | 1,654 | 14,829 | 1,730 | 8,905 | 16,726 | 396 | 1,908 | 1,624 | 6,938 | 1,598 | N/A | 129,830 |
| 1993 | 68,020 | 1,951 | 22,374 | 2,111 | 4,369 | 18,076 | 470 | 1,825 | 1,823 | 6,995 | 1,851 | N/A | 129,865 |
| 1994 | 73,532 | 2,279 | 20,588 | 1,706 | 751 | 17,874 | 349 | 1,744 | 1,424 | 6,153 | 2,264 | N/A | 128,664 |
| 1995 | 48,339 | 1,510 | 28,537 | 1,186 | 242 | 12,702 | 295 | 1,153 | 625 | 3,848 | 3,639 | N/A | 102,076 |
| 1996 | 33,218 | 904 | 42,251 | 1,083 | 62 | 10,326 | 249 | 471 | 493 | 1,944 | 4,438 | N/A | 95,439 |
| 1997 | 61,510 | 1,328 | 35,113 | 555 | 96 | 18,027 | 564 | 1,428 | 1,283 | 3,869 | 6,577 | N/A | 130,350 |
| 1998 | 110,885 | 2,875 | 43,628 | 697 | 157 | 17,105 | 904 | 1,857 | 955 | 4,790 | 8,695 | N/A | 192,548 |
| 1999 | 100,302 | 4,546 | 28,026 | 933 | 214 | 11,864 | 732 | 1,907 | 1,160 | 6,863 | 9,187 | N/A | 165,734 |
| 2000 | 134,368 | 7,764 | 21,308 | 1,025 | 245 | 12,286 | 1,081 | 2,414 | 2,360 | 7,282 | 11,318 | N/A | 201,451 |
| 2001 | 180,277 | 12,814 | 23,189 | 1,636 | 300 | 13,211 | 862 | 2,820 | 4,224 | 6,969 | 19,219 | N/A | 265,521 |
| 2002 | 199,637 | 17,485 | 28,767 | 2,004 | 242 | 13,271 | 1,078 | 1,528 | 3,263 | 6,655 | 19,941 | N/A | 293,871 |
| 2003 | 183,330 | 18,833 | 33,308 | 2,493 | 256 | 10,435 | 1,564 | 2,210 | 2,956 | 6,100 | 21,557 | N/A | 283,042 |
| 2004 | 207,268 | 20,235 | 37,631 | 3,161 | 271 | 13,464 | 1,609 | 1,652 | 2,456 | 5,115 | 8,853 | N/A | 301,715 |
| 2005 | 235,852 | 19,375 | 57,655 | 2,601 | 506 | 14,350 | 2,378 | 2,300 | 2,360 | 6,309 | 6,731 | 88 | 350,505 |
| 2006 | 184,565 | 16,997 | 53,745 | 3,025 | 357 | 16,138 | 1,865 | 2,634 | 3,232 | 7,094 | 11,462 | 10 | 301,124 |
| 2007 | 200,574 | 14,108 | 64,746 | 2,480 | 526 | 19,386 | 2,233 | 3,587 | 2,599 | 6,553 | 16,077 | 6 | 332,875 |
| 2008 | 188,330 | 18,708 | 55,764 | 4,989 | 811 | 17,544 | 3,497 | 4,257 | 2,761 | 11,596 | 15,916 | 122 | 324,295 |
| 2009 | 176,232 | 22,693 | 47,998 | 4,177 | 829 | 19,680 | 3,249 | 3,090 | 2,643 | 5,903 | 15,092 | 7 | 301,593 |
| 2010 | 218,006 | 11,303 | 44,347 | 2,267 | 551 | 7,525 | 387 | 1,764 | 2,337 | 3,030 | 1,676 | N/A | 293,193 |
| Total | 3,066,413 | 200,769 | 765,012 | 45,801 | 31,625 | 398,276 | 27,021 | 69,782 | 47,009 | 162,991 | 209,686 | 233 | 5,024,618 |

| | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--|-----------------|---|--------------------------|
| AP:Autos particulares | SUV:Camionetas particulares SUV | COM: Combis (Vagonetas) | MIC:Microbuses | V ≤ 3.8t: Vehículos de carga de hasta 3.8 ton | TAX: Taxis |
| PU:Pick Up | TRA:Tractocamiones | AUT: Autobuses ≤ 3.8t: Vehículcarga has AUT:Autobuses ta 3.8 | MC:Motocicletas | V > 3.8t: Vehículos de carga mayores de 3.8 ton | AUT ESC: Autobús escolar |

Fuente: (SMA, 2012, pág. A 11)

Tabla 4-6 Recorrido anual de los vehículos de la ZMVM, 2010

| Año Modelo | Millones de Kilómetros recorridos al año (KRV) en la ZMVM | | | | | | | | | | | | Total |
|--------------|---|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | AP | TAX | SUV | COM | MIC | PU | V ≤ 3.8t | TRA | AUT | V > 3.8t | MC | Metrobús | |
| 1986 y ant. | 1,362 | 64 | 196 | 138 | 31 | 647 | 38 | 293 | 63 | 480 | 242 | N/A | 3,554 |
| 1987 | 114 | 10 | 26 | 29 | 3 | 80 | 3 | 12 | 3 | 20 | 42 | N/A | 342 |
| 1988 | 173 | 14 | 30 | 27 | 7 | 131 | 2 | 15 | 4 | 32 | 54 | N/A | 490 |
| 1989 | 372 | 18 | 60 | 25 | 36 | 182 | 5 | 19 | 8 | 52 | 87 | N/A | 866 |
| 1990 | 516 | 32 | 72 | 60 | 188 | 193 | 8 | 19 | 16 | 70 | 95 | N/A | 1,269 |
| 1991 | 610 | 65 | 110 | 70 | 446 | 236 | 8 | 26 | 29 | 105 | 63 | N/A | 1,767 |
| 1992 | 715 | 99 | 144 | 103 | 533 | 224 | 8 | 25 | 41 | 114 | 39 | N/A | 2,045 |
| 1993 | 685 | 117 | 225 | 125 | 260 | 245 | 9 | 24 | 30 | 114 | 46 | N/A | 1,880 |
| 1994 | 758 | 137 | 211 | 102 | 44 | 244 | 7 | 23 | 28 | 98 | 56 | N/A | 1,707 |
| 1995 | 520 | 91 | 306 | 69 | 13 | 177 | 6 | 15 | 16 | 60 | 90 | N/A | 1,363 |
| 1996 | 361 | 54 | 460 | 64 | 4 | 144 | 5 | 6 | 16 | 31 | 110 | N/A | 1,254 |
| 1997 | 670 | 80 | 382 | 32 | 5 | 254 | 11 | 19 | 53 | 61 | 163 | N/A | 1,729 |
| 1998 | 1,210 | 173 | 475 | 41 | 8 | 240 | 18 | 24 | 17 | 77 | 215 | N/A | 2,497 |
| 1999 | 1,097 | 273 | 305 | 55 | 11 | 165 | 15 | 25 | 29 | 110 | 227 | N/A | 2,313 |
| 2000 | 1,466 | 467 | 233 | 55 | 13 | 172 | 22 | 32 | 65 | 118 | 280 | N/A | 2,921 |
| 2001 | 2,105 | 770 | 269 | 97 | 17 | 198 | 19 | 37 | 148 | 120 | 475 | N/A | 4,253 |
| 2002 | 2,619 | 1,052 | 376 | 117 | 14 | 215 | 25 | 20 | 153 | 116 | 494 | N/A | 5,202 |
| 2003 | 2,405 | 1,133 | 435 | 145 | 15 | 169 | 37 | 29 | 121 | 107 | 534 | N/A | 5,131 |
| 2004 | 2,727 | 1,218 | 492 | 187 | 16 | 222 | 38 | 22 | 117 | 90 | 219 | N/A | 5,347 |
| 2005 | 3,114 | 1,166 | 754 | 154 | 31 | 230 | 56 | 31 | 103 | 109 | 167 | 7 | 5,922 |
| 2006 | 2,437 | 1,223 | 704 | 207 | 25 | 259 | 43 | 35 | 149 | 128 | 284 | 1 | 5,494 |
| 2007 | 2,645 | 1,016 | 849 | 169 | 35 | 312 | 51 | 47 | 118 | 112 | 398 | 0.4 | 5,754 |
| 2008 | 2,509 | 1,349 | 753 | 348 | 57 | 290 | 80 | 56 | 128 | 207 | 394 | 10 | 6,182 |
| 2009 | 2,364 | 1,641 | 640 | 289 | 59 | 329 | 74 | 41 | 131 | 99 | 374 | 1 | 6,042 |
| 2010 | 2,888 | 817 | 588 | 160 | 40 | 124 | 8 | 23 | 133 | 47 | 42 | N/A | 4,869 |
| Total | 36,441 | 13,081 | 9,092 | 2,868 | 1,913 | 5,681 | 597 | 917 | 1,718 | 2,675 | 5,188 | 19.00 | 80,191 |

Fuente: (SMA, 2012, págs. A-12)

La distribución temporal asignada a las emisiones de monóxido de carbono para el inventario de emisiones de la ZMVM (2010) por fuentes móviles se utilizó para modelar la distribución horaria de los flujos de calor por el transporte en la Ciudad de México, ya que involucran a los procesos de combustión. Lo mismo se hizo para las emisiones de CO por fuentes puntuales por la industria. Para los sectores comercial y de servicios se consideraron las emisiones de COV por uso de solventes en los sectores comercial, industrial y de servicios, dado que son un indicador de la intensidad de actividad de los sectores.

Para el sector residencial las emisiones de COV más significativas son debidas a fugas e hidrocarburos no quemados (HCNQ) de gas L.P., ya que éste es el energético mayormente utilizado por el sector. Así, se consideró que la distribución horaria de las actividades de combustión en el sector residencial corresponde a la de las emisiones de HCNQ (Tabla 4-7).

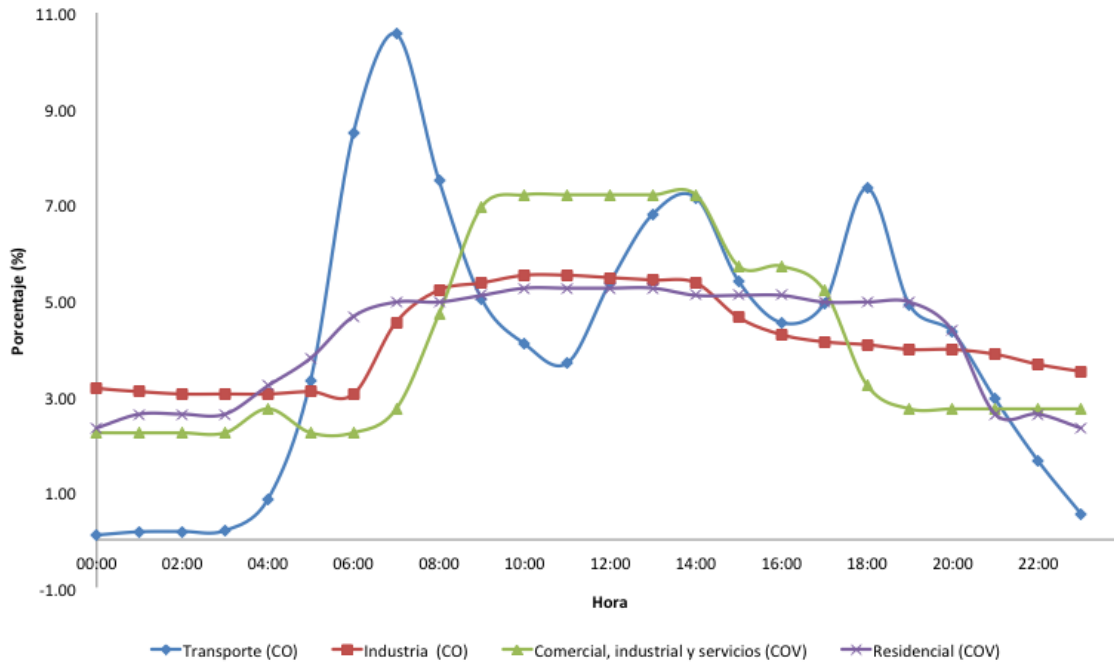
Los perfiles horarios considerados para representar la actividad horaria de los procesos de combustión se muestran en la Figura 4-6. Para el perfil de la industria (Industria-CO) se tiene un periodo de actividad máxima entre las 7:00 y las 14:00 horas. El perfil que representa la actividad de combustión en los sectores comercial y de servicios (Comercial, industrial y servicios-COV) el periodo de mayor actividad está entre las 8:00 y 17:00 horas. El sector residencial (Residencial-COV) presenta un periodo de actividad mayor entre las 6:00 y 20:00 horas. El sector transporte (Transporte-CO) considera distintos periodos de actividad, el primero que tiene mayor actividad es entre las 4:00 y 9:00 horas, el segundo entre las 12:00 y 15:00 horas, y el último entre las 17:00 y 20:00 horas.

Consideraciones en cuanto a los procesos de combustión

Para los procesos de combustión de las distintas fuentes: transporte, industria, residencial, comercial y servicios; se asume que la emisión del calor sensible sucede al momento de la combustión del combustible, es decir, se considera que el perfil horario del calor generado por las distintas fuentes es igual al del consumo de combustibles.

En todo proceso de combustión se genera calor sensible y calor latente, este último es el vapor de agua producto de la reacción química debida a la combustión de hidrocarburos. Aunque esta conversión puede tener dos componentes en el presente trabajo se asume que todo el calor generado es calor sensible.

Figura 4-6 Distribución horaria de las actividades de combustión de combustibles fósiles en la Ciudad de México, 2010



Fuente: Elaboración propia con información de SMA (2012)

4.2.1. Perfil horario de las emisiones de calor por consumo de energía eléctrica

La aportación a la componente antropógena al balance superficial del clima urbano por el consumo eléctrico de acuerdo a la Tabla 3-3 se requiere conocer el perfil horario real de cada fuente de emisión y su localización geográfica por región (celda).

Para la estimación de esta contribución, se asumirá que el comportamiento horario en la demanda eléctrica de todos los sectores es aquella que se tiene para la red eléctrica que alimenta a la Ciudad de México. El Sistema Interconectado Nacional es un sistema que cuenta con seis áreas de control interconectadas (Central, Oriental Occidental, Norte, Noreste y Peninsular) y dos áreas aisladas (Noroeste y Baja California). Un Área de Control es un segmento del sistema eléctrico a la cual le corresponde operar, controlar y administrar la red eléctrica dentro de un ámbito geográfico determinado, con seguridad, calidad, continuidad y economía.

Tabla 4-7 Contribución por fuente al Inventario de emisiones de la ZMVM, 2010

| Hora | Fuentes de Emisiones | | | Distribución horaria porcentual | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------------|--|---------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------|
| | Emisiones de CO totales (Móviles) | Puntuales | Área (Comercial, industrial y servicios) | Área (Residencial) | Emisiones de CO | | Emisiones de COV por fuentes de área | |
| | | | | | Totales (F. Móviles) | Fuentes puntuales | Comercial industrial y servicios | Residencial |
| | Toneladas por hora de CO (t/h) | | Toneladas por hora de COV (t/h) | | % | | | |
| 00:00 | 5 | 0.61 | 4.50 | 4.00 | 0.10 | 3.15 | 2.23 | 2.33 |
| 01:00 | 8.4 | 0.6 | 4.50 | 4.50 | 0.16 | 3.09 | 2.23 | 2.62 |
| 02:00 | 8.8 | 0.59 | 4.50 | 4.50 | 0.17 | 3.04 | 2.23 | 2.62 |
| 03:00 | 9.7 | 0.59 | 4.50 | 4.50 | 0.19 | 3.04 | 2.23 | 2.62 |
| 04:00 | 43.2 | 0.59 | 5.50 | 5.50 | 0.84 | 3.04 | 2.73 | 3.21 |
| 05:00 | 171 | 0.6 | 4.50 | 6.50 | 3.33 | 3.09 | 2.23 | 3.79 |
| 06:00 | 436.1 | 0.59 | 4.50 | 8.00 | 8.50 | 3.04 | 2.23 | 4.66 |
| 07:00 | 541.7 | 0.88 | 5.50 | 8.50 | 10.55 | 4.54 | 2.73 | 4.96 |
| 08:00 | 384.9 | 1.01 | 9.50 | 8.50 | 7.50 | 5.21 | 4.71 | 4.96 |
| 09:00 | 257.6 | 1.04 | 14.00 | 8.75 | 5.02 | 5.36 | 6.95 | 5.10 |
| 10:00 | 209.7 | 1.07 | 14.50 | 9.00 | 4.09 | 5.52 | 7.20 | 5.25 |
| 11:00 | 189.4 | 1.07 | 14.50 | 9.00 | 3.69 | 5.52 | 7.20 | 5.25 |
| 12:00 | 275.8 | 1.06 | 14.50 | 9.00 | 5.37 | 5.47 | 7.20 | 5.25 |
| 13:00 | 348.9 | 1.05 | 14.50 | 9.00 | 6.80 | 5.42 | 7.20 | 5.25 |
| 14:00 | 366.5 | 1.04 | 14.50 | 8.75 | 7.14 | 5.36 | 7.20 | 5.10 |
| 15:00 | 277.1 | 0.9 | 11.50 | 8.75 | 5.40 | 4.64 | 5.71 | 5.10 |
| 16:00 | 232.6 | 0.83 | 11.50 | 8.75 | 4.53 | 4.28 | 5.71 | 5.10 |
| 17:00 | 253 | 0.8 | 10.50 | 8.50 | 4.93 | 4.13 | 5.21 | 4.96 |
| 18:00 | 376.3 | 0.79 | 6.50 | 8.50 | 7.33 | 4.07 | 3.23 | 4.96 |
| 19:00 | 251.4 | 0.77 | 5.50 | 8.50 | 4.90 | 3.97 | 2.73 | 4.96 |
| 20:00 | 222.3 | 0.77 | 5.50 | 7.50 | 4.33 | 3.97 | 2.73 | 4.37 |
| 21:00 | 150.6 | 0.75 | 5.50 | 4.50 | 2.93 | 3.87 | 2.73 | 2.62 |
| 22:00 | 84.5 | 0.71 | 5.50 | 4.50 | 1.65 | 3.66 | 2.73 | 2.62 |
| 23:00 | 27.9 | 0.68 | 5.50 | 4.00 | 0.54 | 3.51 | 2.73 | 2.33 |
| Total | 5,132.40 | 19.40 | 201.50 | 171.50 | 100 | 100.0 | 100.00 | 100.00 |

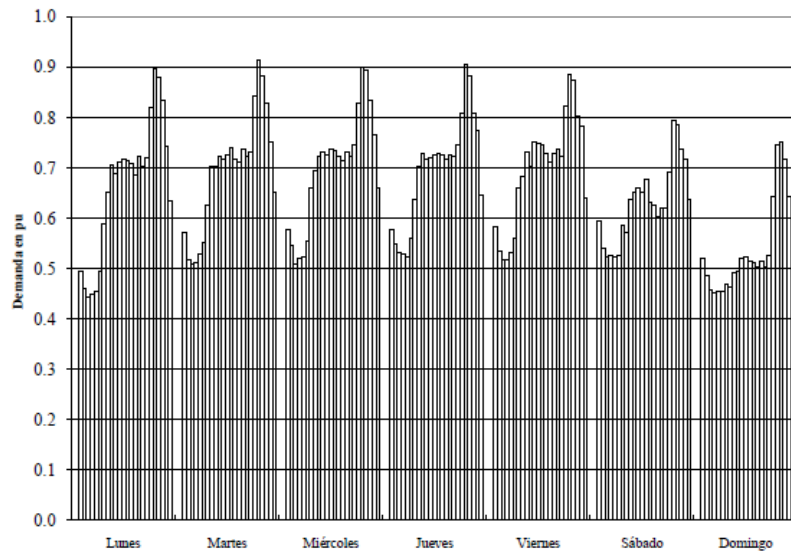
Fuente: (SMA, 2012, págs. 26,44)

La Ciudad de México está conectada al área de control denominada Central, por lo que se considera la distribución horaria del consumo eléctrico de cada sector igual a la distribución de la curva de demanda eléctrica horaria de ésta área de control.

Por cada Área de Control se generan las curvas de carga típica diaria (CCTD) (Figura 4-7), estas curvas son los perfiles de demanda para cada hora de siete días típicos de la semana en un mes o año determinado, referidos a la demanda máxima anual del área o

sistema por medio de una unidad de parametrización denominada pu (pu: por unidad relativa a la demanda máxima anual). En el eje de las ordenadas se tienen valores de demanda en pu y el eje de las abscisas representa los veinticuatro valores para cada uno de los siete días de la semana. Para la determinación de los días típicos se excluyen los días festivos tanto oficiales como religiosos.

Figura 4-7 Curva de carga típica diaria (CCTD), 2010



*pu: Por unidad referida a la demanda máxima anual.
Fuente: (CFE, 2011)

Se generan también las Curvas típicas de demanda horaria (Figura 4-8), que muestran el comportamiento de la demanda horaria por día de la semana y mes. En el eje de las ordenadas se tienen los valores de demanda referidos a la demanda máxima anual y el eje de las abscisas representa las 24 horas de cada día de la semana. En la determinación de los días típicos se excluyen los días festivos, tanto oficiales como religiosos.

El consumo de energía se refiere a la energía eléctrica demandada por los usuarios y los equipos que permiten transportarla desde los centros de generación hasta los centros de consumo.

$$\text{Consumo} = \text{generación bruta} + \text{enlace neto} + \text{productores externos} + \text{importación} - \text{exportación}$$

Los usuarios de la red son tanto a nivel residencial, como comercial, servicios, agrícola e industrial, por ello se asume que el perfil de demanda horaria de todos ellos corresponderá a la misma curva.

El análisis se hace con información de la operación de la Región operativa Central del Sistema Interconectado Nacional (SIN), a la que pertenece la ZMVM, esta es una de las ocho regiones en que se divide la operación y en donde las principales localidades son la Ciudad de México, Toluca, Cuernavaca, Tula y Pachuca (Tabla 4-8).

Tabla 4-8 Área de Control Central del Sistema Interconectado Nacional

| Área | Región | Principales localidades |
|----------------|----------------|--|
| <i>Central</i> | <i>Central</i> | Cd. de México Toluca Cuernavaca Tula Pachuca |

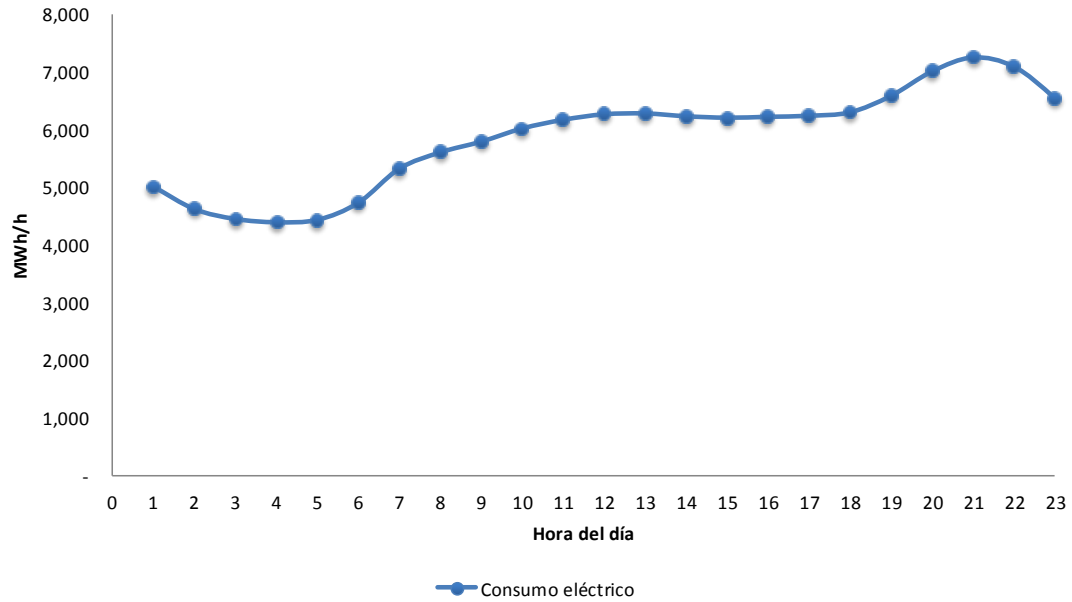
La curva de demanda horaria empleada considera un promedio de los días hábiles y los fines de semana, no están considerados los días feriados.

4.2.1. Perfil horario de las emisiones de calor por el metabolismo humano

Al igual que para los procesos de combustión, se asumirá que toda la energía eléctrica consumida genera calor sensible (Iamarino, Beevers S., y Grimmond, 2011) y el perfil horario de éste será la misma distribución que se tiene en la curva típica de demanda horaria tanto para días hábiles como días típicos de fin de semana correspondiente al Área de Control Central de manera anual o mensual.

En la estimación del calor metabólico se considerarán los valores estándar dados para hombres mujeres y niños (Tabla 4-9) los periodos de actividad en la Ciudad de México se asume de una duración de 16 horas del día, y un periodo pasivo con las ocho horas restantes, con los horarios que se muestran en la Tabla 4-9.

Figura 4-8 Demanda eléctrica horaria correspondiente al subsistema Central del Sistema Interconectado Nacional, 2010



Fuente: Elaboración propia con información de CFE (2011)

Tabla 4-9 Periodos de actividad humana

| Actividad | Horario | W/pers |
|---|-----------|--------|
| Periodo pasivo (Dormir) | 23 a 7 hr | 72 |
| Periodo activo (Estar sentado con actividad ligera) (50%) | 7 a 23 hr | 115 |

Fuente: (Grimmond, 1992)

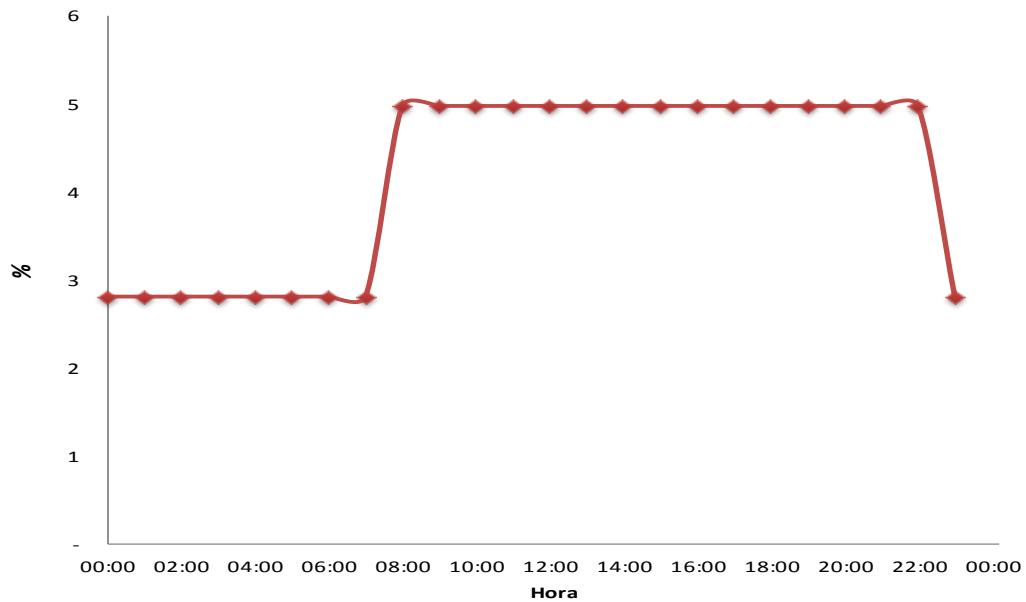
La población considerada son los habitantes de los municipios conurbados en la ZMVM y definida como Ciudad de México (Tabla 4-10).

Tabla 4-10 Habitantes de la Ciudad de México en 2010

| Municipio | Población total en 2010 | Municipio | Población total en 2010 |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | Personas | | Personas |
| Azcapotzalco | 414,711 | Chimalhuacán | 614,453 |
| Coyoacán | 620,416 | Ecatepec de Morelos | 1,656,107 |
| Cuajimalpa de Morelos | 186,391 | Huixquilucan | 242,167 |
| Gustavo A. Madero | 1,185,772 | Ixtapaluca | 467,361 |
| Iztacalco | 384,326 | Jaltenco | 26,328 |
| Iztapalapa | 1,815,786 | Melchor Ocampo | 50,240 |
| La Magdalena Contreras | 239,086 | Naucalpan de Juárez | 833,779 |
| Milpa Alta | 130,582 | Nezahualcóyotl | 1,110,565 |
| Álvaro Obregón | 727,034 | Nextlalpan | 31,691 |
| Tláhuac | 360,265 | Nicolás Romero | 366,602 |
| Tlalpan | 650,567 | Papalotla | 4,47 |
| Xochimilco | 415,007 | La Paz | 253,845 |
| Benito Juárez | 385,439 | Tecámac | 364,579 |
| Cuauhtémoc | 531,831 | Teoloyucan | 63,115 |
| Miguel Hidalgo | 372,889 | Teotihuacán | 53,010 |
| Venustiano Carranza | 430,978 | Tepetlaoxtoc | 27,944 |
| Acolman | 136,558 | Tepotzotlán | 88,559 |
| Atenco | 56,243 | Texcoco | 235,151 |
| Atizapán de Zaragoza | 489,937 | Tezoyuca | 35,199 |
| Coacalco de Berriozábal | 278,064 | Tlalnepantla de Baz | 664,225 |
| Coyotepec | 39,030 | Tultepec | 131,567 |
| Cuautitlán | 140,059 | Tultitlán | 486,998 |
| Chalco | 310,13 | Zumpango | 159,647 |
| Chiautla | 26,191 | Cuautitlán Izcalli | 511,675 |
| Chicoloapan | 175,053 | Valle de Chalco Solidaridad | 357,645 |
| Chiconcuac | 22,819 | Total | 10,525,164 |

Fuente: INEGI, Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos (<http://sc.inegi.org.mx/sistemas/cobdem/>)

Figura 4-9 Distribución porcentual horaria del calor generado por el metabolismo humano en la Ciudad de México, 2010



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos (<http://sc.inegi.org.mx/sistemas/cobdem/>).

4.3. Planteamiento del modelo

4.3.1. Componente vehicular de calor (Q_{FV})

Para cuantificar la componente vehicular, de acuerdo con la Tabla 3-3, se requiere conocer el consumo de combustible por tipo de vehículo, por hora del día y por región (celda). Sin embargo, esta información no está disponible para la ZMVM.

Por ello estimamos el consumo de combustibles para toda la región de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{FVc}(t) = \frac{\sum n_{ij} * L_i(t) * E f_{ij}}{A * 3600} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

$Q_{FVc}(t)$ es el flujo de calor horario generado por el transporte a partir de combustibles por unidad de área

Donde:

n_{ij} es el número de vehículos por tipo (i) y por año-modelo (j), (Tabla 4-5).

L_i es la distancia recorrida por año por tipo de vehículo con la distribución horaria dada para las emisiones de CO por transporte, (Tabla 4-6).

Ef_{ij} es la eficiencia energética vehicular por tipo y por año-modelo, (Tabla 4-13).

A es el área de la Ciudad de México con uso de suelo urbano, (Tabla 4-1).

La información utilizada para la caracterización del parque vehicular y la distancia recorrida se tomó del Inventario de Emisiones para la Zona Metropolitana del Valle de México de 2010 (SMA, 2012).

Esta componente tiene otro término que es el consumo de energía eléctrica por los sistemas de transporte, como el metro o trolebús. De este tipo de transporte se conoce el consumo eléctrico y se le asigna la misma distribución horaria que al transporte automotor (Transporte-CO). Este término es el siguiente:

$$Q_{FVe} = \frac{\sum C_e(t)}{A*3600} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde:

C_e : Es el consumo de energía eléctrica por el transporte (Tabla 4-12).

A : Es el área de la Ciudad de México con uso de suelo urbano (Tabla 4-1).

Tabla 4-11 Consumo energético sectorial en la ZMVM, 2010

| Sectores | Consumo de energía | Gasolina Magna | Pemex Diésel | Gasolina Premium | Diésel Industrial | Gas L.P. | Electricidad | G.N. | Total |
|-----------------------|--------------------|----------------|--------------|------------------|-------------------|----------|--------------|------|-------|
| | % | PJ | | | | | | | |
| Transporte | 47 | 223 | 64 | 19 | - | 16 | 10 | - | 332 |
| Industrial | 27 | - | - | - | 4 | 9 | 122 | 52 | 187 |
| Residencial | 17 | - | - | - | - | 63 | 52 | 8 | 123 |
| Comercial y servicios | 9 | - | - | - | - | 12 | 50 | 2 | 64 |
| Total | 100 | 223 | 64 | 19 | 4 | 100 | 234 | 62 | 706 |

Nota: J, Joule es la unidad energética convencionalmente seleccionada en la elaboración de inventarios de emisiones, los PJ son Peta Joule o 10^{15} J.

Fuente: Elaboración propia con información de SMA (2012, pág. 17 y 18)

Considerando los procesos de combustión y el consumo de energía eléctrica en el transporte la componente vehicular queda como:

$$Q_{FV} = \frac{\sum n_{ij} * L_i(t) * Ef_{ij} + \sum C_e(t)}{A * 3600} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Tabla 4-12 Eficiencia energética por tipo de vehículo y año modelo de la flota vehicular de la ZMVM, 2010

| Año-modelo | AP* | Taxis* | Combis*/SUV/PU/V carga<3.8 ton | MIC** | Autobús** | MC** | V carga>3.8 ton | MB |
|------------|-------|--------|--------------------------------|-------|-----------|------|-----------------|-------|
| | MJ/Km | | | | | | | |
| 1988 | 3.52 | 3.18 | 5.06 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1989 | 3.60 | 3.27 | 4.99 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1990 | 3.52 | 3.24 | 4.7 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1991 | 3.56 | 3.27 | 4.91 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1992 | 3.60 | 3.31 | 4.99 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1993 | 3.56 | 3.34 | 5.06 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1994 | 3.60 | 3.27 | 4.84 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1995 | 3.52 | 2.97 | 5.23 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1996 | 3.56 | 3.00 | 5.23 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1997 | 3.38 | 2.95 | 5.06 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1998 | 3.27 | 2.87 | 5.06 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 1999 | 3.34 | 2.92 | 5.06 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 2000 | 3.38 | 2.92 | 4.99 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 2001 | 3.27 | 2.89 | 4.84 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 2002 | 3.24 | 2.89 | 4.84 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 2003 | 3.18 | 2.89 | 4.5 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 2004 | 3.21 | 2.89 | 4.44 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | - |
| 2005 | 3.24 | 2.82 | 4.32 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | 12.76 |
| 2006 | 3.31 | 2.79 | 4.38 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | 12.76 |
| 2007 | 3.31 | 2.77 | 4.38 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | 12.76 |
| 2008 | 3.31 | 2.77 | 4.38 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | 12.76 |
| 2009 | 3.31 | 2.77 | 4.38 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | 12.76 |
| 2010 | 3.31 | 2.77 | 4.38 | 8 | 20 | 1.2 | 15.53 | 12.76 |

Nota: J, Joule es la unidad energética convencionalmente seleccionada en la elaboración de inventarios de emisiones, los MJ son Mega Joule o 10⁶ J.

Fuente:* (Solís y Sheinbaum, 2013)** (Chávez y Sheinbaum, 2014)

4.3.2. Componente de calor por fuentes estacionarias (Q_{FS})

Al igual que para la componente vehicular, para las componentes estacionarias, de edificación e industrial, no hay información del consumo de energía por establecimiento y localización geográfica. Por lo que se plantea el siguiente modelo. El consumo de combustibles y consumo eléctrico está dado por las ecuaciones 4-4 y 4-5.

$$Q_{FI} = \frac{\sum C_s(t)}{A*3600} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

$$Q_{FE} = \frac{\sum C_{uv}(t)}{A*3600} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Como:

$$Q_{FS} = Q_{FI} + Q_{FE} \quad \text{Ecuación 4-6}$$

Se tiene:

$$Q_{FS} = \frac{\sum C_{lm}(t)}{A*3600} \quad \text{Ecuación 4-7}$$

Donde:

C : Es el consumo energético horario, en el caso del consumo de combustibles el perfil horario es el de las emisiones de CO para la Industria, para el comercial y servicios el de COV por solventes y para el residencial el de COV por fugas y combustión ineficiente del Gas L.P. (Tabla 4-6). En el caso del consumo eléctrico para todos los sectores se usa el perfil horario de la curva de demanda para el Área Central del SIN (Tabla 4-9).

l : Es el sector: Industria, residencial o comercial y servicios.

m : Consumo de combustibles o de energía eléctrica (Tabla 4-11).

A : Es el área de la Ciudad de México con uso de suelo urbano (Tabla 4-1).

Tabla 4-13 Distribución horaria de la demanda eléctrica anual del Área Central del Sistema Interconectado Nacional, 2010

| Hora | Distribución horaria porcentual de la demanda | Hora | Distribución horaria porcentual de la demanda |
|-------|---|--------------|---|
| | % | | % |
| 00:00 | 3.56 | | |
| 01:00 | 3.29 | 13:00 | 4.43 |
| 02:00 | 3.16 | 14:00 | 4.41 |
| 03:00 | 3.12 | 15:00 | 4.43 |
| 04:00 | 3.15 | 16:00 | 4.44 |
| 05:00 | 3.36 | 17:00 | 4.48 |
| 06:00 | 3.79 | 18:00 | 4.68 |
| 07:00 | 3.99 | 19:00 | 4.99 |
| 08:00 | 4.12 | 20:00 | 5.16 |
| 09:00 | 4.28 | 21:00 | 5.05 |
| 10:00 | 4.39 | 22:00 | 4.65 |
| 11:00 | 4.46 | 23:00 | 4.14 |
| 12:00 | 4.47 | Total | 100.00 |

4.3.3. Componente de calor del metabolismo humano (Q_{FM})

Para esta componente, según el modelo de la Tabla 3-3 se propone una tasa metabólica como el de Grimmond (1992), en donde el día se divide en dos periodos, uno activo con ocho horas de duración y el otro pasivo de 16 horas. Con lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_{FM} = \frac{n * M(t)}{A * 3600} \quad \text{Ecuación 4-8}$$

Donde:

n : Es la población de la Ciudad de México (Tabla 4-11).

M : Es la tasa metabólica humana (Tabla 4-10).

A : Es el área de la Ciudad de México con uso de suelo urbano (Tabla 4-1).

Se tiene la estimación de Q_F como:

$$Q_F = Q_{FV} + Q_{FS} + Q_{FM} \quad \text{Ecuación 4-9}$$

$$Q_F = \frac{\sum n_{ij} * L_i(t) * E f_{ij} + \sum C_e(t) + \sum C_{lm}(t) + n * M(t)}{A * 3600} \quad \text{Ecuación 4-10}$$

4.4. Procedimiento de validación del modelo

La estimación de la componente antropogénica al balance superficial de la Ciudad de México considera aquellas fuentes cuyas contribuciones son las más significativas, como son: el transporte, la industria, la edificación, comercial, de servicios y residencial; y el metabolismo humano. El año de estimación es el 2010.

De acuerdo a Sailor (2011), las estimaciones de calor antropogénico con el enfoque de calor residual son útiles para la validación y verificación de las estimaciones realizadas por medio de otro enfoque o mediante una combinación de enfoques. El resultado de este trabajo se valida mediante el estudio experimental realizado en una zona urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México en el año 1998 (Tejeda y Jáuregui, 2005), y en donde el valor estimado para la contribución antropogénica fue de 20 Wm^{-2} (Oke *et al.*, 1999).

El estudio se realizó con el enfoque de balance residual de energía, entre el 1 y 14 de diciembre de 1998. Normalmente un arreglo experimental de este tipo debe contemplar periodos más largos de observación, que pueden llegar a ser hasta de un año, para poder observar la variabilidad estacional de todas las componentes del balance energético (Grimmond, 1992). Cabe mencionar que el mismo valor se estimó en Oke *et al.* (1999) para la Ciudad de México en 1993, por lo que se espera que la estimación para el 2010 esté cercano al valor experimental obtenido por Oke *et al.* (1999).

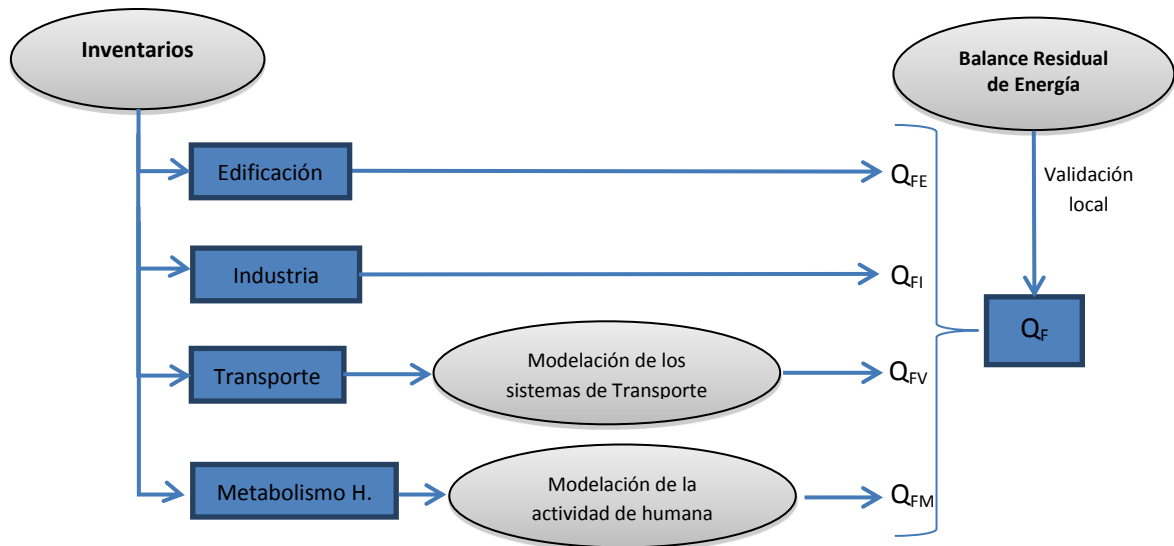
El enfoque de balance de calor residual, también requiere que se realice en una localidad homogénea, en donde principalmente no se encuentren edificios muy altos. En el caso de este estudio los edificios contiguos al punto de observación no superaban los tres pisos

de altura, así mismo se menciona que se observaron condiciones meteorológicas estables, como baja nubosidad.

De igual manera, Sailor (2011) sugiere para la estimación de las emisiones de calor antropogénico se utilicen tanto los enfoques de inventarios junto como el de modelación, este último principalmente en la edificación y el transporte. Se propone en la figura 4-10 el esquema de validación mediante mediciones micrometeorológicas y basado en el ensamble de metodologías que se muestra en la figura 4-3. Este esquema muestra también el enfoque por medio del cual se evalúan las contribuciones antropogénicas de calor de las distintas fuentes, ya sea por medio de la modelación, como en el caso del transporte y del metabolismo humano, o a través de información estadística o de inventarios, como en el caso de la industria y de la edificación comercial, de servicios y residencial.

Por otro lado, con el empleo de estos alcances metodológicos es posible estimar la variabilidad horaria de los flujos de calor antropogénico por fuente, sin embargo del resultado experimental sólo se tiene una estimación correspondiente a todo el periodo de observación.

Figura 4-10 Esquema de validación de las estimaciones de las emisiones de calor antropogénico



Fuente: Elaboración propia con información de Sailor (2011)

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de la ecuación 4-11 expresa el perfil horario de la componente antropogénica del balance superficial energético para el clima urbano de la Ciudad de México. Y de acuerdo a la información disponible de cada subcomponente se obtiene un perfil horario promedio anual.

El consumo energético anualizado obtenido para el transporte por consumo de combustibles a partir de la ecuación 4-2 fue de 351.87 PJ, que es 9% mayor al reportado por SMA (2012) para las fuentes móviles. Los demás consumos energéticos son los reportados en SMA (2012) (Tabla 4-12).

El valor promedio horario de Q_F para el 2010 es de 22.63 Wm^{-2} , con valores durante el día entre 9.52 y 32 Wm^{-2} (Tabla 5-3). El valor promedio es del orden de la componente antropogénica estimada para la Ciudad de México por Oke y Jáuregui (1999), de 20 Wm^{-2} . En promedio la combustión de combustibles contribuye con el 65.1%, el consumo de energía eléctrica con 27.3% y el metabolismo humano con el 7.6%, que fue mayor al valor que generalmente se le asigna a esta subcomponente (2%). La subcomponente con mayor contribución es el transporte, con una participación promedio horaria de 42.2%; después está la industria con el 28.4%, el sector residencial con el 14.7%, el metabolismo humano con 7.6% y los sectores comercial y servicios con el 7.1%.

La incertidumbre total promedio del modelo, calculada de acuerdo a las tablas 5-5 y 5-6, es de 22.1%. La incertidumbre promedio del sector transporte es de 38.6%, la del metabolismo humano de 31.6%, la del sector residencial de 15.6%, la de los sectores comercial y de servicios de 11.4%, y la del industrial de 7%.

Tabla 5-1 Consumo energético por fuente (PJ)

| Hora | Componente | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------|------------|-------------|-----------------------|------------|------------------------------|------------|-------------|-----------------------|------------|
| | Consumo de combustibles | | | | | Consumo de energía eléctrica | | | | |
| | Transporte | Industria | Residencial | Comercial y servicios | Subtotal | Transporte | Industria | Residencial | Comercial y servicios | Subtotal |
| | TJ | | | | | | | | | |
| 00:00 | 0.94 | 10.45 | 4.71 | 0.67 | 16.77 | 0.03 | 11.91 | 5.08 | 4.88 | 22.85 |
| 01:00 | 1.58 | 10.28 | 5.30 | 0.76 | 17.92 | 0.04 | 10.98 | 4.68 | 4.50 | 21.07 |
| 02:00 | 1.65 | 10.10 | 5.30 | 0.76 | 17.82 | 0.05 | 10.58 | 4.51 | 4.33 | 20.29 |
| 03:00 | 1.82 | 10.10 | 5.30 | 0.76 | 17.99 | 0.05 | 10.44 | 4.45 | 4.28 | 20.03 |
| 04:00 | 8.11 | 10.10 | 6.48 | 0.93 | 25.63 | 0.23 | 10.54 | 4.49 | 4.32 | 20.22 |
| 05:00 | 32.12 | 10.28 | 7.66 | 1.09 | 51.15 | 0.91 | 11.25 | 4.79 | 4.61 | 21.57 |
| 06:00 | 81.91 | 10.10 | 9.43 | 1.35 | 102.79 | 2.33 | 12.65 | 5.39 | 5.19 | 24.27 |
| 07:00 | 101.75 | 15.07 | 10.02 | 1.43 | 128.27 | 2.89 | 13.33 | 5.68 | 5.46 | 25.56 |
| 08:00 | 72.30 | 17.30 | 10.02 | 1.43 | 101.04 | 2.05 | 13.77 | 5.87 | 5.64 | 26.41 |
| 09:00 | 48.39 | 17.81 | 10.31 | 1.47 | 77.98 | 1.38 | 14.31 | 6.10 | 5.87 | 27.45 |
| 10:00 | 39.39 | 18.33 | 10.61 | 1.52 | 69.84 | 1.12 | 14.67 | 6.25 | 6.01 | 28.14 |
| 11:00 | 35.58 | 18.33 | 10.61 | 1.52 | 66.02 | 1.01 | 14.90 | 6.35 | 6.11 | 28.57 |
| 12:00 | 51.80 | 18.15 | 10.61 | 1.52 | 82.08 | 1.47 | 14.93 | 6.36 | 6.12 | 28.64 |
| 13:00 | 65.53 | 17.98 | 10.61 | 1.52 | 95.64 | 1.86 | 14.82 | 6.31 | 6.07 | 28.42 |
| 14:00 | 68.84 | 17.81 | 10.31 | 1.47 | 98.44 | 1.96 | 14.76 | 6.29 | 6.05 | 28.30 |
| 15:00 | 52.05 | 15.41 | 10.31 | 1.47 | 79.25 | 1.48 | 14.79 | 6.31 | 6.06 | 28.37 |
| 16:00 | 43.69 | 14.21 | 10.31 | 1.47 | 69.69 | 1.24 | 14.84 | 6.32 | 6.08 | 28.46 |
| 17:00 | 47.52 | 13.70 | 10.02 | 1.43 | 72.67 | 1.35 | 14.98 | 6.38 | 6.14 | 28.73 |
| 18:00 | 70.68 | 13.53 | 10.02 | 1.43 | 95.66 | 2.01 | 15.66 | 6.67 | 6.42 | 30.03 |
| 19:00 | 47.22 | 13.19 | 10.02 | 1.43 | 71.86 | 1.34 | 16.66 | 7.10 | 6.83 | 31.96 |
| 20:00 | 41.76 | 13.19 | 8.84 | 1.26 | 65.05 | 1.19 | 17.24 | 7.35 | 7.07 | 33.07 |
| 21:00 | 28.29 | 12.84 | 5.30 | 0.76 | 47.19 | 0.80 | 16.86 | 7.19 | 6.91 | 32.34 |
| 22:00 | 15.87 | 12.16 | 5.30 | 0.76 | 34.09 | 0.45 | 15.55 | 6.63 | 6.37 | 29.83 |
| 23:00 | 5.24 | 11.65 | 4.71 | 0.67 | 22.27 | 0.15 | 13.83 | 5.90 | 5.67 | 26.53 |
| Consumo por día | 964.03 | 332.08 | 202.14 | 28.88 | 1,527.13 | 27.40 | 334.25 | 142.47 | 136.99 | 641.10 |
| Consumo anual | 351,872.45 | 121,210.00 | 73,780.00 | 10,540.00 | 557,402.45 | 10,000.00 | 122,000.00 | 52,000.00 | 50,000.00 | 234,000.00 |

Tabla 5-2 Consumo energético por fuente (MW)

| Hora | Combustión de combustibles | | | | Energía eléctrica | | | |
|------------------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| | Transporte | Industria | Residencial | Comercial y servicios | Transporte | Industria | Residencial | Comercial y servicios |
| | MW | | | | MW | | | |
| 00:00 | 260.88 | 2,901.98 | 1,309.60 | 187.09 | 7.41 | 3,308.53 | 1,410.19 | 1,355.95 |
| 01:00 | 438.28 | 2,854.41 | 1,473.30 | 210.47 | 12.46 | 3,050.94 | 1,300.40 | 1,250.39 |
| 02:00 | 459.15 | 2,806.84 | 1,473.30 | 210.47 | 13.05 | 2,937.92 | 1,252.23 | 1,204.07 |
| 03:00 | 506.11 | 2,806.84 | 1,473.30 | 210.47 | 14.38 | 2,900.60 | 1,236.32 | 1,188.77 |
| 04:00 | 2,254.00 | 2,806.84 | 1,800.70 | 257.24 | 64.06 | 2,928.14 | 1,248.06 | 1,200.06 |
| 05:00 | 8,922.07 | 2,854.41 | 2,128.10 | 304.01 | 253.56 | 3,124.15 | 1,331.60 | 1,280.39 |
| 06:00 | 22,753.88 | 2,806.84 | 2,619.20 | 374.17 | 646.65 | 3,514.85 | 1,498.13 | 1,440.51 |
| 07:00 | 28,263.65 | 4,186.47 | 2,782.90 | 397.56 | 803.24 | 3,701.46 | 1,577.67 | 1,516.99 |
| 08:00 | 20,082.48 | 4,804.93 | 2,782.90 | 397.56 | 570.73 | 3,824.94 | 1,630.30 | 1,567.60 |
| 09:00 | 13,440.49 | 4,947.65 | 2,864.75 | 409.25 | 381.97 | 3,975.35 | 1,694.41 | 1,629.24 |
| 10:00 | 10,941.27 | 5,090.37 | 2,946.60 | 420.94 | 310.94 | 4,074.82 | 1,736.81 | 1,670.01 |
| 11:00 | 9,882.10 | 5,090.37 | 2,946.60 | 420.94 | 280.84 | 4,137.89 | 1,763.69 | 1,695.86 |
| 12:00 | 14,390.10 | 5,042.79 | 2,946.60 | 420.94 | 408.96 | 4,147.38 | 1,767.74 | 1,699.75 |
| 13:00 | 18,204.15 | 4,995.22 | 2,946.60 | 420.94 | 517.35 | 4,115.30 | 1,754.06 | 1,686.60 |
| 14:00 | 19,122.44 | 4,947.65 | 2,864.75 | 409.25 | 543.45 | 4,098.69 | 1,746.98 | 1,679.79 |
| 15:00 | 14,457.92 | 4,281.62 | 2,864.75 | 409.25 | 410.89 | 4,109.14 | 1,751.44 | 1,684.08 |
| 16:00 | 12,136.10 | 3,948.60 | 2,864.75 | 409.25 | 344.90 | 4,120.98 | 1,756.48 | 1,688.92 |
| 17:00 | 13,200.49 | 3,805.88 | 2,782.90 | 397.56 | 375.15 | 4,160.42 | 1,773.29 | 1,705.09 |
| 18:00 | 19,633.77 | 3,758.31 | 2,782.90 | 397.56 | 557.98 | 4,349.28 | 1,853.79 | 1,782.49 |
| 19:00 | 13,117.00 | 3,663.16 | 2,782.90 | 397.56 | 372.78 | 4,629.02 | 1,973.02 | 1,897.14 |
| 20:00 | 11,598.69 | 3,663.16 | 2,455.50 | 350.79 | 329.63 | 4,789.14 | 2,041.27 | 1,962.76 |
| 21:00 | 7,857.68 | 3,568.01 | 1,473.30 | 210.47 | 223.31 | 4,684.17 | 1,996.53 | 1,919.74 |
| 22:00 | 4,408.86 | 3,377.72 | 1,473.30 | 210.47 | 125.30 | 4,320.33 | 1,841.45 | 1,770.63 |
| 23:00 | 1,455.71 | 3,235.00 | 1,309.60 | 187.09 | 41.37 | 3,842.85 | 1,637.94 | 1,574.94 |
| Consumo por día | 267,787.25 | 92,245.05 | 56,149.16 | 8,021.31 | 7,610.35 | 92,846.27 | 39,573.82 | 38,051.75 |

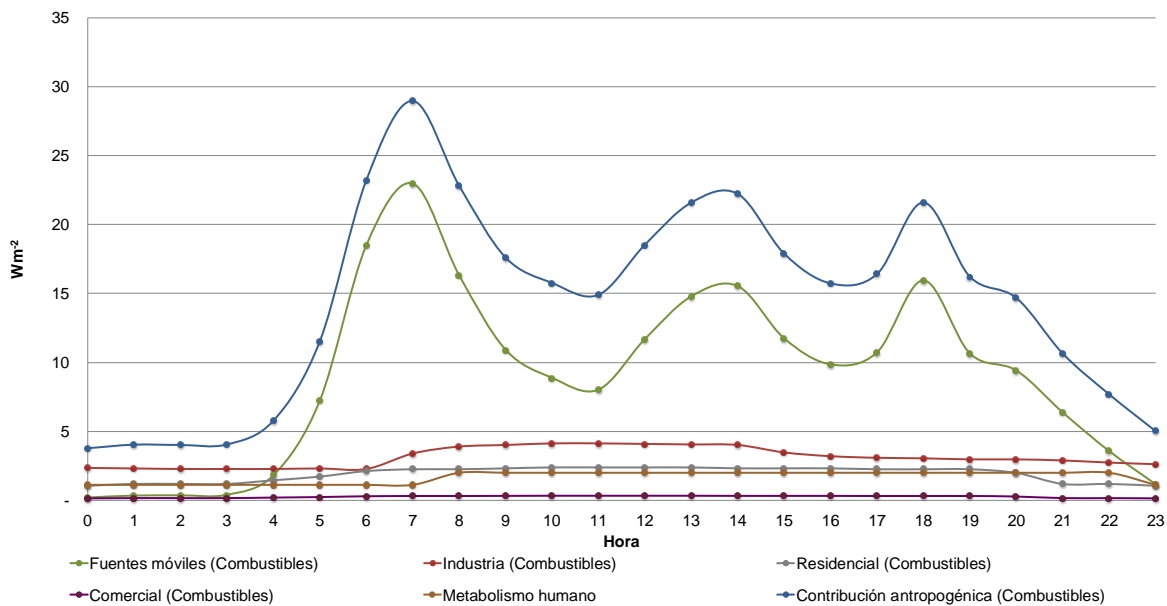
Tabla 5-3 Contribución antropogénica horaria al balance superficial energético de la Ciudad de México en 2010 por fuente y combustibles (Wm⁻²)

| Hora | Combustión de combustibles | | | | | Consumo de energía eléctrica | | | | | Metabolismo humano | Total |
|----------------------|----------------------------|-------------|-------------|-----------------------|--------------|------------------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|--------------------|--------------|
| | Transporte | Industria | Residencial | Comercial y servicios | Sub total | Transporte | Industria | Residencial | Comercial y servicios | Sub total | | |
| | W/m ² | | | | | | | | | | | |
| 00:00 | 0.21 | 2.36 | 1.06 | 0.15 | 3.80 | 0.01 | 2.69 | 1.15 | 1.10 | 4.94 | 1.13 | 9.88 |
| 01:00 | 0.36 | 2.32 | 1.20 | 0.17 | 4.07 | 0.01 | 2.48 | 1.06 | 1.02 | 4.56 | 1.13 | 9.76 |
| 02:00 | 0.37 | 2.28 | 1.20 | 0.17 | 4.05 | 0.01 | 2.39 | 1.02 | 0.98 | 4.39 | 1.13 | 9.57 |
| 03:00 | 0.41 | 2.28 | 1.20 | 0.17 | 4.09 | 0.01 | 2.36 | 1.00 | 0.97 | 4.34 | 1.13 | 9.56 |
| 04:00 | 1.83 | 2.28 | 1.46 | 0.21 | 5.90 | 0.05 | 2.38 | 1.01 | 0.98 | 4.42 | 1.13 | 11.45 |
| 05:00 | 7.25 | 2.32 | 1.73 | 0.25 | 11.99 | 0.21 | 2.54 | 1.08 | 1.04 | 4.87 | 1.13 | 18.00 |
| 06:00 | 18.49 | 2.28 | 2.13 | 0.30 | 24.35 | 0.53 | 2.86 | 1.22 | 1.17 | 5.77 | 1.13 | 31.25 |
| 07:00 | 22.97 | 3.40 | 2.26 | 0.32 | 30.37 | 0.65 | 3.01 | 1.28 | 1.23 | 6.18 | 1.13 | 37.68 |
| 08:00 | 16.32 | 3.91 | 2.26 | 0.32 | 23.82 | 0.46 | 3.11 | 1.33 | 1.27 | 6.17 | 2.01 | 32.00 |
| 09:00 | 10.92 | 4.02 | 2.33 | 0.33 | 18.28 | 0.31 | 3.23 | 1.38 | 1.32 | 6.24 | 2.01 | 26.53 |
| 10:00 | 8.89 | 4.14 | 2.39 | 0.34 | 16.31 | 0.25 | 3.31 | 1.41 | 1.36 | 6.33 | 2.01 | 24.65 |
| 11:00 | 8.03 | 4.14 | 2.39 | 0.34 | 15.40 | 0.23 | 3.36 | 1.43 | 1.38 | 6.40 | 2.01 | 23.81 |
| 12:00 | 11.70 | 4.10 | 2.39 | 0.34 | 19.25 | 0.33 | 3.37 | 1.44 | 1.38 | 6.52 | 2.01 | 27.78 |
| 13:00 | 14.80 | 4.06 | 2.39 | 0.34 | 22.50 | 0.42 | 3.34 | 1.43 | 1.37 | 6.56 | 2.01 | 31.07 |
| 14:00 | 15.54 | 4.02 | 2.33 | 0.33 | 23.18 | 0.44 | 3.33 | 1.42 | 1.37 | 6.56 | 2.01 | 31.75 |
| 15:00 | 11.75 | 3.48 | 2.33 | 0.33 | 18.61 | 0.33 | 3.34 | 1.42 | 1.37 | 6.47 | 2.01 | 27.09 |
| 16:00 | 9.86 | 3.21 | 2.33 | 0.33 | 16.34 | 0.28 | 3.35 | 1.43 | 1.37 | 6.43 | 2.01 | 24.78 |
| 17:00 | 10.73 | 3.09 | 2.26 | 0.32 | 17.07 | 0.30 | 3.38 | 1.44 | 1.39 | 6.51 | 2.01 | 25.59 |
| 18:00 | 15.96 | 3.05 | 2.26 | 0.32 | 22.58 | 0.45 | 3.54 | 1.51 | 1.45 | 6.94 | 2.01 | 31.53 |
| 19:00 | 10.66 | 2.98 | 2.26 | 0.32 | 16.88 | 0.30 | 3.76 | 1.60 | 1.54 | 7.21 | 2.01 | 26.10 |
| 20:00 | 9.43 | 2.98 | 2.00 | 0.29 | 15.27 | 0.27 | 3.89 | 1.66 | 1.60 | 7.41 | 2.01 | 24.69 |
| 21:00 | 6.39 | 2.90 | 1.20 | 0.17 | 11.05 | 0.18 | 3.81 | 1.62 | 1.56 | 7.17 | 2.01 | 20.23 |
| 22:00 | 3.58 | 2.75 | 1.20 | 0.17 | 7.92 | 0.10 | 3.51 | 1.50 | 1.44 | 6.55 | 2.01 | 16.47 |
| 23:00 | 1.18 | 2.63 | 1.06 | 0.15 | 5.10 | 0.03 | 3.12 | 1.33 | 1.28 | 5.77 | 1.13 | 12.00 |
| Prom./Dia | 9.07 | 3.12 | 1.90 | 0.27 | 14.92 | 0.26 | 3.14 | 1.34 | 1.29 | 6.03 | 1.68 | 22.63 |
| Part. Prom. % | 41.1 | 14.2 | 8.6 | 1.2 | 65.1 | 1.2 | 14.2 | 6.1 | 5.8 | 27.3 | 7.6 | |

*Part. Prom: Participación promedio.

Los resultados de la tabla 5-3 muestran que la mayor contribución promedio a lo largo del día corresponde a la combustión de combustibles con el 65.1%, después se tiene al consumo de energía eléctrica con el 27.3% y finalmente el metabolismo humano con 7.6%. La contribución porcentual de esta última subcomponente es mayor a la mencionada en la literatura, de alrededor del 2%.

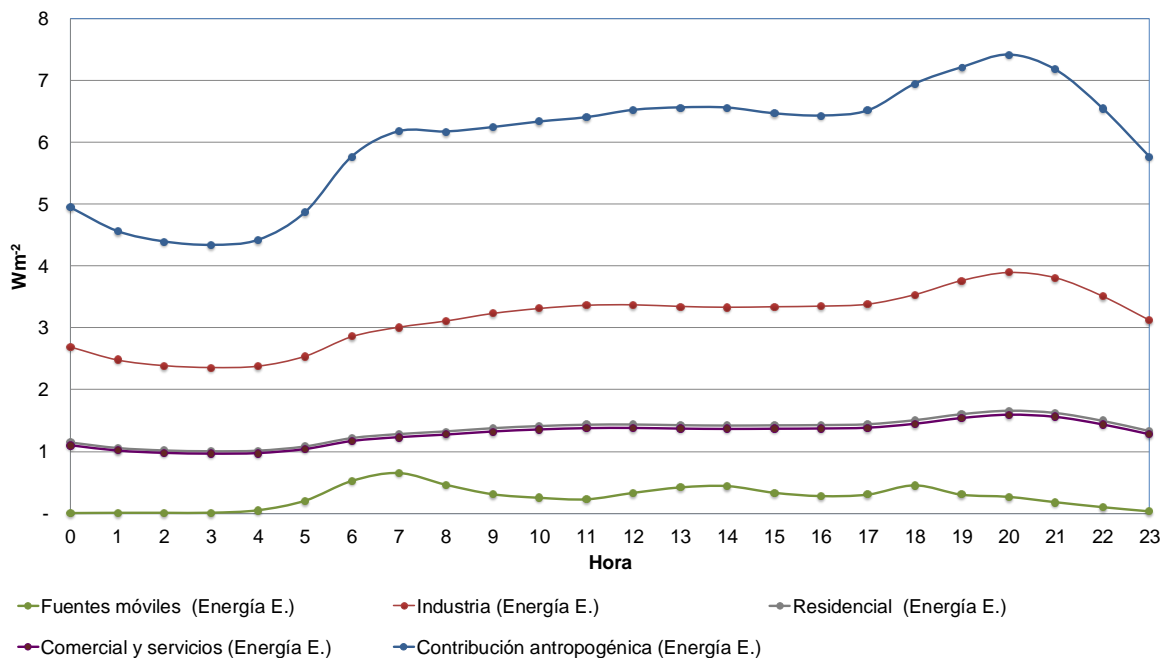
Figura 5-1 Contribución antropogénica horaria al balance superficial energético de la Ciudad de México por combustión de combustibles y metabolismo humano (Wm^{-2}), 2010



De acuerdo a la figura 5-1 la contribución predominante de las actividades de combustión de combustibles fósiles fue por el transporte vehicular. Ésta contribución tiene durante el día tres periodos en donde se presentan valores máximos de la actividad y que son: de las 4 a las 10 horas, de las 11 a las 16 horas; y de las 17 a las 21 horas.

De manera decreciente se tienen las contribuciones de los sectores industrial, residencial, después el metabolismo humano y al final el sector del comercio y servicios. Todas estas contribuciones al calor antropogénico durante el día tienen un comportamiento estable, es decir, sin cambios tan marcados que como en el caso del transporte. La contribución a la componente de calor antropogénico durante el día alcanza valores dentro del intervalo [$3.8 Wm^{-2}$, $30.4 Wm^{-2}$], el valor mínimo lo alcanza a las 0 horas y el máximo a las 7 horas. En cuanto al metabolismo humano sus valores son $1.1 Wm^{-2}$ de las 23 a las 7 horas y $2 Wm^{-2}$ de las 8 a las 22 horas.

Figura 5-2 Contribución antropogénica horaria al balance superficial energético de la Ciudad de México por consumo de energía eléctrica (Wm^{-2}), 2010



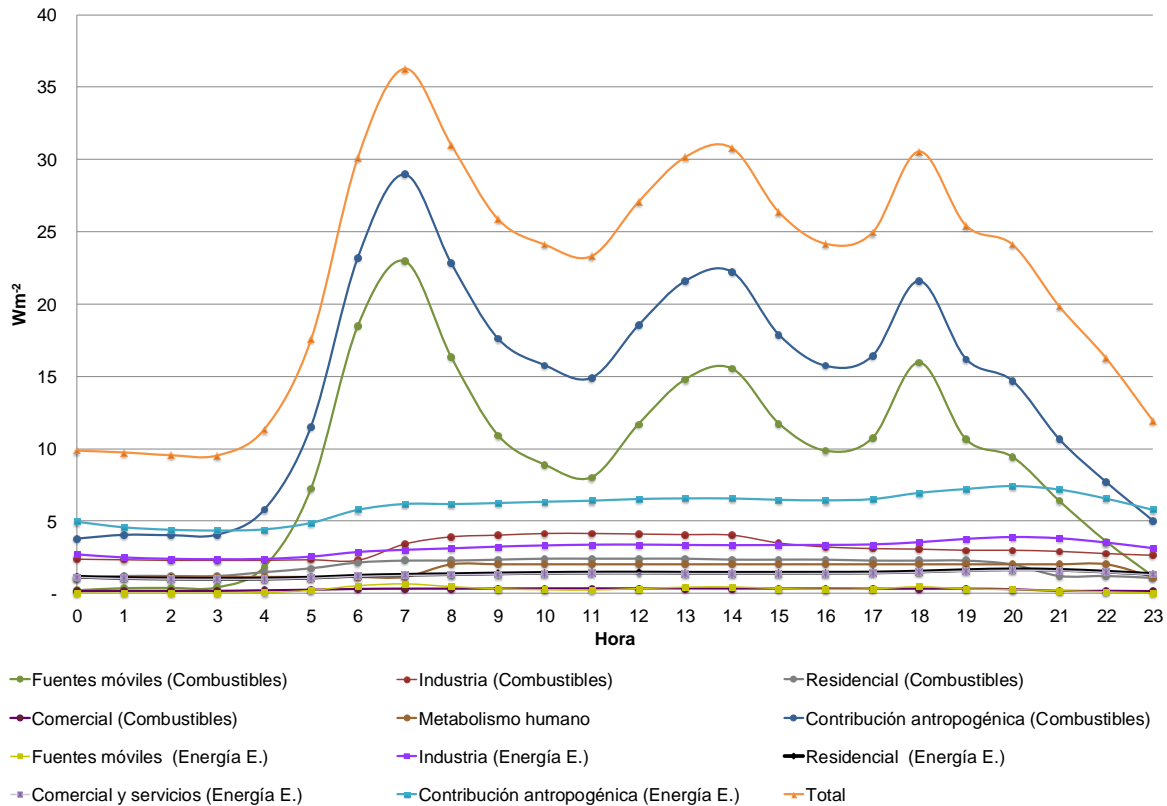
De acuerdo a la figura 5-2 la fuente de consumo de energía eléctrica más relevante es la industria, después se tienen las contribuciones de los sectores residencial y comercial y servicios, seguidas de la del transporte.

También, en dicha figura se observa que la contribución al calor antropogénico de las fuentes por el consumo de energía eléctrica no tiene grandes cambios durante el día, por ser la diferencia entre los valores máximos y mínimos menor a $2 Wm^{-2}$. Los valores de la contribución a la componente antropogénica de calor están en el intervalo [$4.3 Wm^{-2}$, $7.4 Wm^{-2}$], el valor mínimo se observa a las 3 horas y el máximo a las 20 horas.

La figura 5-3 muestra que la fuente con mayor aportación al calor de origen antropogénico es el transporte vehicular a partir de combustibles fósiles, al ser su participación promedio horaria del 41.1%. Las siguientes fuentes son la industria por consumo de combustibles fósiles y por consumo de energía eléctrica, con participaciones promedio horarias iguales de 14.2%. Después están las contribuciones del sector residencial por consumo de combustibles con 8.6% y la del metabolismo humano con 7.6%, seguidas por las del sector residencial por consumo de energía eléctrica con 6.1%, del sector comercial y de

servicios tanto por consumo de energía eléctrica como por consumo de combustibles con 5.8% y 1.2% respectivamente y , finalmente, el transporte eléctrico con 1.2%.

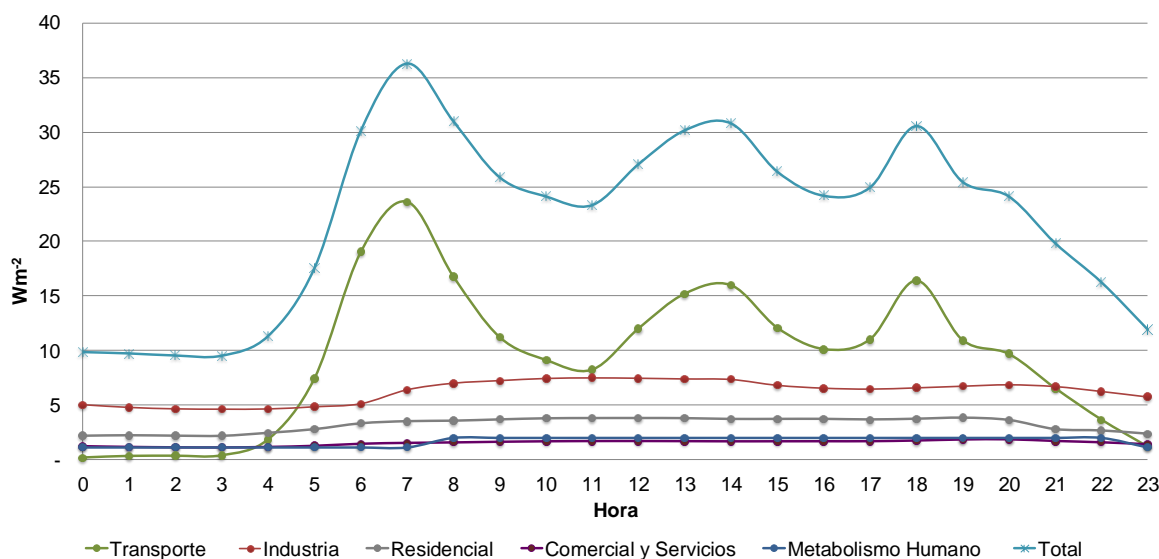
Figura 5-3 Contribución antropogénica horaria al balance superficial energético de la Ciudad de México por fuente y combustible (Wm^{-2}), 2010



La figura 5-4 muestra la contribución horaria de la componente antropogénica al balance superficial energético de la región urbana de la Ciudad de México. Esta subcomponente, de acuerdo a la tabla 5-3, tuvo un valor promedio horario de $22.6 Wm^{-2}$ en el 2010. Los valores que alcanza Q_F durante el día están en el intervalo $[9.6 Wm^{-2}, 37.68 Wm^{-2}]$, el valor mínimo se tiene a las 3 horas y el máximo a las 7 horas.

Comparando el resultado de Q_F para la región urbana de la Ciudad de México y las regiones urbanas de otras grandes ciudades, como Los Ángeles o Montreal, con valores de 21 y $99 Wm^{-2}$ respectivamente (Tabla 2-2).

Figura 5-4 Contribución antropogénica horaria al balance superficial energético de la Ciudad de México por fuente (Wm^{-2}), 2010



5.1. **Estimación de la incertidumbre**

La incertidumbre asociada al modelo está vinculada con los supuestos realizados, como en el caso del transporte se tiene que todas los autos, sin importar el tipo y año-modelo, circulan con el mismo calendario. Así mismo, los perfiles horarios utilizados para la modelación del comportamiento de cada una de las fuentes generan incertidumbre. Todos estos factores contribuyen a una sobre o subestimación de cada una de las subcomponentes y a su vez de la componente antropogénica total. Para este valor se presenta un análisis cualitativo de la incertidumbre, que si bien no es un método que calcula estadísticamente la incertidumbre asociada a Q_F , es valiosa para señalar las debilidades potenciales de la estimación y contar con una valoración de su incertidumbre.

Para la determinación de la incertidumbre por subcomponente así como para la componente antropogénica se siguen las guías de buenas prácticas o la *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (2000). En estas guías se presentan criterios para asignar incertidumbre a factores de emisión de gases de efecto invernadero y a los datos de actividad cuando no se tiene una incertidumbre experimental asociada a estos valores. Estos criterios están basados en dictámenes de expertos.

La incertidumbre asociada a las estimaciones es producto de errores sistemáticos y aleatorios. La mayoría de los países desarrollados preparan estadísticas energéticas, denominadas balances de energía, lo que permite detectar los errores sistemáticos. En esas circunstancias, los errores sistemáticos generales suelen ser pequeños, se estima que están en un rango de $\pm 5\%$. En los países que tienen sistemas de datos energéticos no tan avanzados, el rango puede ser considerablemente mayor, de $\pm 10\%$. También, debe considerarse que las actividades informales pueden aumentar la incertidumbre hasta el 50% en algunos sectores. En la Tabla 5-4, "Grado de incertidumbre asociada a los datos de actividad de las fuentes fijas de combustión", figuran estimaciones más detalladas de la incertidumbre.

Tabla 5-4 Grado de incertidumbre asociada a los datos de actividad de las fuentes de combustión

| Sector | Sistemas estadísticos avanzados | | Sistemas estadísticos menos avanzados | |
|--|---------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|
| | Encuestas | Extrapolaciones | Encuestas | Extrapolaciones |
| Electricidad pública, generación conjunta y calefacción por distritos | Menos de 1% | 3%-5% | 1%-2% | 5%-10% |
| Combustión comercial, institucional y residencial | 3%-5% | 5%-10% | 10%-15% | 15%-25% |
| Combustión industrial (Industrias que hacen un uso intensivo de energía) | 2%-3% | 3%-5% | 2%-3% | 5%-10% |
| Combustión industrial (otras) | 3%-5% | 5%-10% | 10%-15% | 15%-20% |
| Biomasa en fuentes pequeñas | 10%-30% | 20%-40% | 30%-60% | 60%-100% |

El organismo a cargo del inventario deberá decidir cuál es el sistema estadístico que mejor describe las circunstancias nacionales.
Fuente: Dictamen del Grupo de expertos (véase Copresidentes, Editores y Expertos; Fuentes fijas de combustión).

Fuente: (IPCC, 2000, p. 2.43)

Por otro lado, la metodología del IPCC propone factores de emisión por defecto, que pueden estar dados en rangos para que se seleccione el valor más apropiada de acuerdo a las circunstancias nacionales. "La incertidumbre asociada a los factores de emisión (FE) o a los valores caloríficos netos (VCN) es el resultado de dos elementos principales, a saber: la exactitud con que se miden los valores, y la variabilidad en la fuente de suministro del combustible y en la calidad del muestreo de los suministros disponibles. Hay pocos mecanismos de error sistemático en la medición de estas propiedades. Por lo

tanto, puede considerarse que los errores son principalmente aleatorios. En el caso de los combustibles comercializados, es probable que la incertidumbre sea inferior al 5%. En el caso de los combustibles que no se comercializan, la incertidumbre es mayor y, en la mayoría de los casos, se debe a la variabilidad en la composición de los combustibles. No se dispone de rangos de incertidumbre por defecto en relación con los factores de carbono almacenado o los factores de oxidación del carbón. Sin embargo, no hay duda de que es fundamental consultar a los consumidores que usan los combustibles como materia prima o por sus características no combustibles para poder hacer estimaciones exactas del carbono almacenado. De manera similar, los grandes usuarios de carbón pueden proporcionar información acerca de si la combustión que logran con la clase de equipos que utilizan es completa.” (IPCC, 2000)

Se considera también que los países que cuentan con buenos sistemas de reunión de datos, con medidas de control de la calidad de los datos, puedan mantener el margen de error aleatorio en cuanto al total de energía registrado en el entorno de 2% a 3% de la cifra anual (IPCC, 2000).

De acuerdo a los criterios presentados en la tabla 5-4 se asignan a las distintas variables las incertidumbres presentadas en la tabla 5-5:

Tabla 5-5 Incertidumbre asociada a las variables de la ecuación 4-11

| Subcomponente | Variables (Incertidumbre) | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----|-------|-------|
| | n | L | Ef | C_e |
| Transporte | | | | |
| Incertidumbre (%)*** | 10 | 10 | 5 | 2 |
| Industria | C_c | | C_e | |
| Incertidumbre (%) | 3 | | 1 | |
| Residencial | C_c | | C_e | |
| Incertidumbre (%) | 5 | | 5 | |
| Comercial y servicios | C_c | | C_e | |
| Incertidumbre (%) | 5 | | 5 | |
| Metabolismo humano | m (población) | | M | |
| Incertidumbre (%) | 10 | | 30 | |
| Área urbana | A | | | |
| Incertidumbre (%) | 10 | | | |

*El parque vehicular corresponde a los datos de las unidades de finanzas del D.F. y del Edo. De México pero no se presenta un cálculo de la incertidumbre.

**De acuerdo al valor obtenido por Polonia del 7% se supone una incertidumbre del 10% (Kouridis, 2009).

La incertidumbre asociada a la población, que es del 10%, está en función de la fluctuación que puede tener la población en la Ciudad de México a lo largo del día. Para el gasto metabólico se propone una incertidumbre alta, 30%, ya que se refiere al gasto metabólico de un adulto de 1.8 m² de piel, que corresponde a un adulto.

Tabla 5-6 Incertidumbre porcentual asociada a la ecuación 4-11

| Subcomponente | Ecuación | Incertidumbre |
|---|--|---|
| Q_{FV} Calor por el transporte | $Q_{FVc}(t) = \frac{\sum n_{ij} * L_i(t) * E f_{ij}}{A * 3600}$ <p>Ec. 4-2</p> $Q_{FVe} = \frac{\sum C_e(t)}{A * 3600}$ <p>Ec. 4-3</p> | $\delta Q_{FVc}(t) = \delta Q_{FVc} \sqrt{\sum \left(\left(\frac{\delta n_{ij}}{n_{ij}} \right)^2 + \left(\frac{\delta L_i}{L_i} \right)^2 + \left(\frac{\delta E f_{ij}}{E f_{ij}} \right)^2 \right) + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ $\delta Q_{FVe}(t) = \delta Q_{FVe} \sqrt{\sum \left(\left(\frac{\delta C_e}{C_e} \right)^2 \right) + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ |
| Q_{FS} Calor debido a la edificación | $Q_{FI} = \frac{\sum C_s(t)}{A * 3600}$ <p>Ec. 4-5</p> $Q_{FE} = \frac{\sum C_{uv}(t)}{A * 3600}$ <p>Ec. 4-6</p> | $\delta Q_{FIC}(t) = \delta Q_{FIC} \sqrt{\sum \left(\left(\frac{\delta C_c}{C_c} \right)^2 \right) + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ $\delta Q_{FIE}(t) = \delta Q_{FIE} \sqrt{\sum \left(\left(\frac{\delta C_e}{C_e} \right)^2 \right) + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ $\delta Q_{FEC}(t) = \delta Q_{FEC} \sqrt{\sum \left(\left(\frac{\delta C_c}{C_c} \right)^2 \right) + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ $\delta Q_{FEE}(t) = \delta Q_{FEE} \sqrt{\sum \left(\left(\frac{\delta C_e}{C_e} \right)^2 \right) + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ |
| Q_{FM} Calor por el metabolismo humano | $Q_{FM} = \frac{n * M(t)}{A * 3600}$ <p>Ec. 4-9</p> | $\delta Q_{FM}(t) = \delta Q_{FM} \sqrt{\left(\frac{\delta n}{n} \right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m} \right)^2 + 3600 * \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2}$ |

Nota: Se asume que la incertidumbre de las variables se propaga con una desviación estándar.

Tabla 5-7 Incertidumbre porcentual promedio asociada a las subcomponentes de calor antropogénico

| Compo nente | Incertidumbre | | | |
|----------------|-------------------|--------------------|-------------|-------|
| | C. de combustible | C. de E. Eléctrica | Metabolismo | Total |
| | % | | | |
| Q_F | - | - | | 22.4 |
| Q_{FV} | 39.4 | 10.2 | - | 38.6 |
| Q_{FI} | 10.4 | 10.0 | - | 10.2 |
| Q_{FEr} | 11.2 | 11.2 | - | 11.2 |
| Q_{FEcs} | 11.2 | 11.5 | - | 11.4 |
| Q_{FM} | - | - | 31.6 | 31.6 |

*El subíndice "r" se refiere al sector residencial.

**El subíndice "cs" se refiere a los sectores comercial y de servicios.

***C.: Consumo

5.2. Validación del modelo

Para la validación del modelo se emplea el valor obtenido experimentalmente para la Ciudad de México en 1998 por Oke y Jáuregui (1999), estimado en 20 Wm^{-2} . Comparado este valor con el valor promedio horario de $22.08 \pm 4.94 \text{ Wm}^{-2}$, obtenido mediante metodologías top-down y bottom-up para la región urbana de la Ciudad de México y correspondiente al año 2010 se obtuvo una diferencia del 13% que está dentro del rango dado por la incertidumbre asociada al valor.

Para algunas áreas de la Ciudad de México, que concentran la mayor densidad de tráfico o de la actividad industrial, la componente antropogénica de calor puede estar subestimada dado la agregación geográfica de la información utilizada. Pudiéndose hasta duplicar el valor de la fuente de transporte a partir de combustibles fósiles, que representa en promedio el 41.1% del valor de Q_F , en delegaciones del Distrito Federal como Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo Madero, Iztacalco o Venustiano Carranza, así como en los municipios del Estado de México como Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla, en donde se concentra más de las dos terceras partes de las emisiones de monóxido de carbono resultado de la combustión de combustibles (Figura 4-3).

Los máximos locales del perfil horario de Q_F (Figura 5-4) se tienen a las 7, 14 y 18 horas, que junto con los resultados de Jáuregui (1997) se identifica el máximo local de las 7 horas, que es también el máximo total, dentro del periodo en donde la isla de calor urbana es más frecuente e intensa en la Ciudad de México, 21 a 10 horas, en este horario la ICU se observa durante la época de secas (Figura 2-9). El siguiente máximo, 14 horas, está dentro del periodo en donde se observa la ICU diurna, 11 a 15 horas, pero que tiene una menor intensidad de 3 a 5 °C y con duración relativamente menor. Por último, el máximo local ubicado a las 18 horas está dentro del periodo tarde-noche, de 16 a 20 horas, en donde la ICU tiene una intensidad entre 4 y 5 °C y se observa tanto en época de secas como de lluvia.

5.3. Mitigación del calor de origen antropogénico

De acuerdo a Grimmond *et al.* (2010), dado que el fenómeno de isla de calor urbana puede tener impactos negativos en el confort humano e incrementar su morbilidad y mortalidad, la estimación de la contribución antropogénica al balance energético superficial energético debe realizarse con relativa urgencia si se pretende en el mediano plazo (10 años) contar con capacidades técnicas sólidas para el desarrollo de ciudades más sustentables.

En 2010 el consumo de combustibles y energía eléctrica en la Ciudad de México tuvo la distribución sectorial que se muestra en la Tabla 5-8, la mayor participación es por el transporte, seguido de la industria, el sector residencial; y por último, el comercial y de servicios. También se observó que la participación sectorial en el consumo energético de la Ciudad de México fue similar al Nacional.

La demanda de combustibles en la Ciudad de México en el 2010 fue de 527 PJ, contra 443 PJ en 1990. Lo que representó un crecimiento del 19%, sin embargo el consumo energético del transporte aumentó 32% aproximadamente en el mismo periodo. En cuanto a la industria, disminuyó su participación en el consumo de combustibles en 8.5 % con respecto al de 1990. Por su parte el sector residencial aumentó 28 % y el comercial y servicios lo hicieron en 21.5%.

Tabla 5-8 Consumo energético y distribución sectorial en la Ciudad de México y a nivel Nacional, 2010

| Sector | Ciudad de México | | | Nacional | | |
|-------------------------------|------------------|--------------|--------|--------------|-----------------------------------|----------|
| | Electricidad | Combustibles | Total | Electricidad | Combustibles fósiles y renovables | Total |
| | PJ | | | | | |
| Industria | 122.00 | 65.00 | 187.00 | 414.54 | 739.72 | 1,154.26 |
| Transporte | 10.00 | 322.00 | 332.00 | 4.27 | 2,166.46 | 2,170.73 |
| Residencial | 52.00 | 71.00 | 123.00 | 177.90 | 569.15 | 747.05 |
| Comercio y servicios | 50.00 | 14.00 | 64.00 | 75.11 | 74.53 | 149.64 |
| Agricultura y forestal | - | - | - | 30.98 | 116.52 | 147.50 |
| Pesca | - | - | - | - | - | - |
| Otros | - | - | - | 45.93 | - | 45.93 |
| Total | 234.00 | 472.00 | 706.00 | 702.80 | 3,666.38 | 4,415.11 |
| Participación porcentual | | | | | | |
| Sector | % | | | | | |
| Industria | 52.1 | 13.8 | 26.5 | 59.0 | 20.2 | 26.1 |
| Transporte | 4.3 | 68.2 | 47.0 | 0.6 | 59.1 | 49.2 |
| Residencial | 22.2 | 15.0 | 17.4 | 25.3 | 15.5 | 16.9 |
| Comercio y servicios | 21.4 | 3.0 | 9.1 | 10.7 | 2.0 | 3.4 |
| Agricultura y forestal | - | - | - | 4.4 | 3.2 | 3.3 |
| Otros | - | - | - | 6.5 | - | 1.0 |

Nota: Elaboración propia con información de la Agencia Internacional de Energía y el SMA del Gobierno del D.F.

En el perfil horario de la componente antropogénica al balance superficial energético, Q_F (Figura 5-3), la participación promedio horaria de la subcomponente del transporte a partir de la combustión de combustibles es la mayor, ya que representó 41% aproximadamente. El valor promedio horario de Q_F para la Ciudad de México, 22.1 Wm^{-2} , es comparable con el obtenido para ciudades como Berlín o Los Ángeles, de 21 Wm^{-2} . Suponiendo que la participación sectorial en el consumo de combustibles y de energía eléctrica de estas ciudades fue similar a la de sus respectivos países en el 2010, Alemania y EE. UU. En Los Ángeles la mayor participación, al igual que para la Ciudad de México, correspondería al sector transporte, seguido de la industria, residencial y al final el sector de comercio y servicios. A diferencia del consumo en Berlín, en donde la mayor participación

corresponde al sector residencial, seguido del industrial, transporte y, al final, el de comercio y servicios (Tabla 5-9).

Tabla 5-9 Consumo energético y distribución porcentual sectorial en Alemania y Estados Unidos, 2010

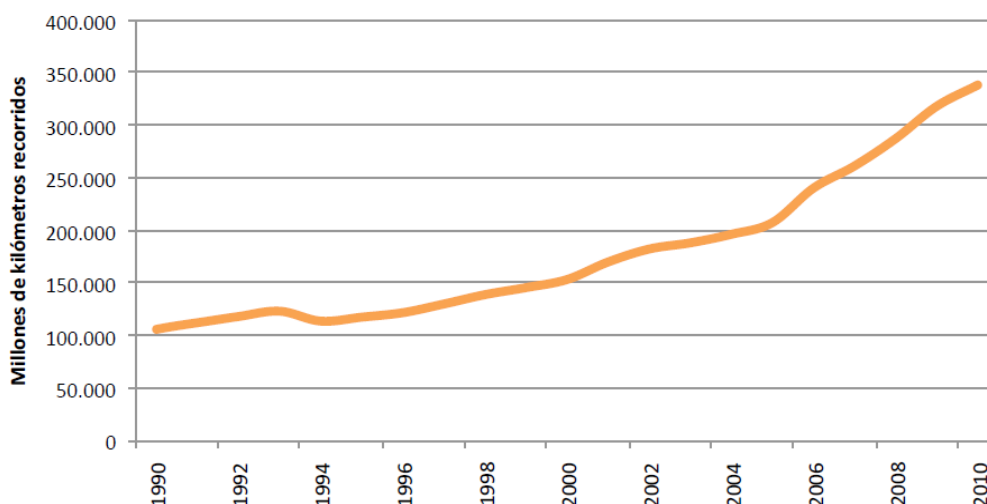
| Sector | Alemania | | | | Estados Unidos | | | |
|-------------------------------------|--------------|--------|--------------|----------|----------------|--------|--------------|-----------|
| | Electricidad | Calor | Combustibles | Total | Electricidad | Calor | Combustibles | Total |
| PJ | | | | | | | | |
| Industria | 811.57 | 145.66 | 1,332.95 | 2,290.18 | 3,166.48 | 219.51 | 8,648.84 | 12,034.83 |
| Transporte | 60.12 | - | 2,187.02 | 2,247.14 | 27.76 | - | 24,897.73 | 24,925.49 |
| Residencial | 510.20 | 188.87 | 1,950.25 | 2,649.32 | 5,205.49 | - | 6,025.60 | 11,231.09 |
| Comercio y servicios | 490.27 | 138.12 | 771.17 | 1,399.56 | 4,789.11 | 58.32 | 3,782.69 | 8,630.13 |
| Agricultura y forestal | 32.41 | - | - | 32.41 | - | - | 672.78 | 672.78 |
| Otros | - | - | - | - | 502.21 | - | - | - |
| Total | 1,904.58 | 472.65 | 6,241.39 | 8,618.61 | 13,691.05 | 277.84 | 44,027.64 | 57,494.31 |
| Participación porcentual (%) | | | | | | | | |
| Industria | 42.6 | 30.8 | 21.4 | 26.6 | 23.1 | 79.0 | 19.6 | 20.8 |
| Transporte | 3.2 | - | 35.0 | 26.1 | 0.2 | - | 56.6 | 43.0 |
| Residencial | 26.8 | 40.0 | 31.2 | 30.7 | 38.0 | - | 13.7 | 19.4 |
| Comercio y servicios | 25.7 | 29.2 | 12.4 | 16.2 | 35.0 | 21.0 | 8.6 | 14.9 |
| Agricultura y forestal | 1.7 | - | - | 0.4 | - | - | 1.5 | 1.2 |
| Otros | - | - | - | - | 3.7 | - | - | 0.9 |

Nota: Elaboración propia con información de la Agencia Internacional de Energía.

La actividad del sector transporte es una fuente importante de calor antropogénico y su actividad entre 1990 y 2009, al pasar de 106 millones de kilómetros vehículo recorridos anuales (KVR) a 339 millones KVR (un incremento de 220 %), lo cual ha ocurrido principalmente por el aumento del parque vehicular privado de 6.2 millones a 21.6 millones y que significa un incremento en el uso del automóvil particular en el país de más de tres veces en tan sólo dos décadas (Figura 5-5). El mayor crecimiento de la actividad de este sector se ha registrado en las principales zonas urbanas del país, en el 2010 la ZM del Valle de México contaba con el mayor número de vehículos registrados y el mayor KVR, seguido por la ZM de Guadalajara en número de KVR y en registros de automóviles por la ZM de Monterrey (Tabla 5-10). Sin embargo, se observa que los KRV (Tabla 5-11)

en la ZMVM entre 1990 y 2009 tuvieron la menor tasa de crecimiento media anual (TCMA), de 5.3%, y la mayor fue la de la ZM de Querétaro, de 9.4%.

Figura 5-5 Actividad del parque vehicular de México (Kilómetros recorridos totales), 1990-2010



Fuente: (IPTD, Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, 2012, pág. 24)

Tabla 5-10 Actividad vehicular en distintas zonas metropolitanas (kilómetros recorridos por vehículo), 2010

| Zona Metropolitana | Automóviles privados registrados | KVR (Millones de km) | KVR Per cápita |
|--------------------|----------------------------------|----------------------|----------------|
| ZM Valle de México | 5,375,474 | 84,552 | 4,260 |
| ZM Guadalajara | 1,209,208 | 18,976 | 4,342 |
| ZM Tijuana | 577,382 | 5,663 | 4,416 |
| ZM Mexicali | 395,644 | 5,821 | 6,308 |
| ZM Chihuahua | 267,132 | 2,533 | 3,016 |
| ZM Tuxtla | 111,951 | 273 | 432 |
| ZM León | 254,446 | 3,018 | 1,709 |
| ZM Puebla-Tlaxcala | 523,474 | 6,210 | 2,361 |
| ZM Aguascalientes | 248,023 | 2,942 | 3,202 |
| ZM Querétaro | 236,300 | 2,803 | 2,592 |
| ZM Monterrey | 1,292,751 | 15,335 | 3,813 |
| ZM Veracruz | 172,790 | 2,042 | 2,586 |

Fuente: (IPTD, Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, 2012)

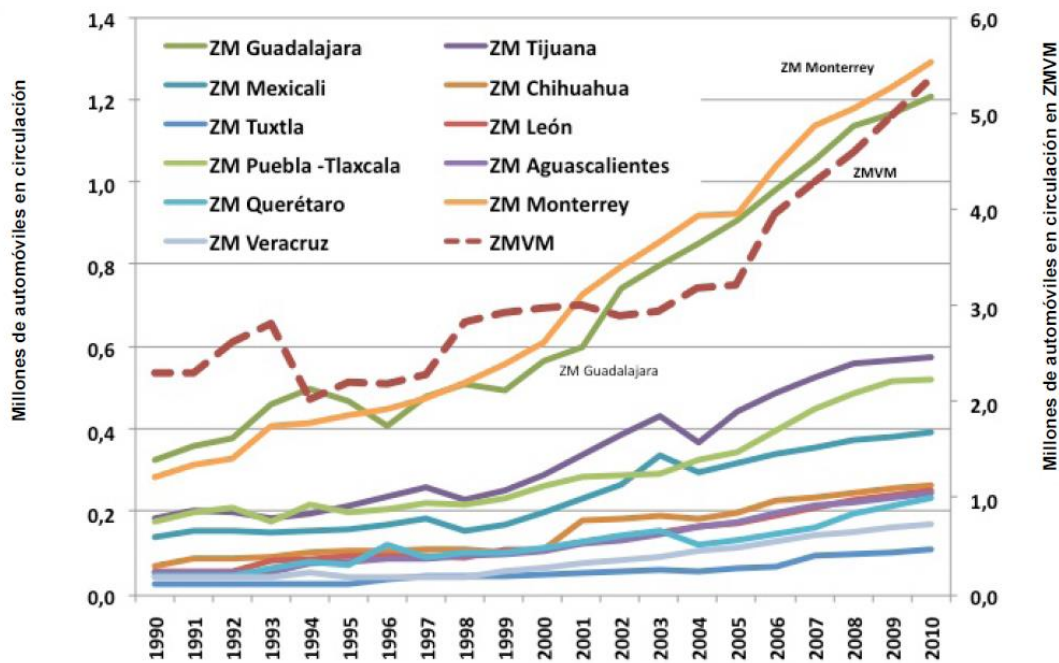
También, en la figura 5-6 se muestra la tendencia del parque vehicular de las principales zonas metropolitanas del país entre 1990 y 2010, la ZMVM tiene el mayor número de vehículos en circulación, así mismo las ZM de Guadalajara y Monterrey tienen las mayores tasas de crecimiento en el periodo.

Tabla 5-11 Actividad vehicular en distintas zonas metropolitanas de México, kilómetros recorridos (KVR) totales y tasa de crecimiento media anual (TCMA), 1990-2009

| Zona Metropolitana | KVR 1990 (Millones de km) | KVR 2009 (Millones de km) | TCMA de KVR |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| ZM Querétaro | 468 | 2,803 | 9.4 |
| ZM Monterrey | 2,823 | 15,335 | 8.8 |
| ZM Aguascalientes | 549 | 2,942 | 8.8 |
| ZM León | 571 | 3,018 | 8.7 |
| ZM Veracruz | 436 | 2,042 | 8.0 |
| ZM Chihuahua | 59 | 273 | 8.0 |
| ZM Tuxtla | 561 | 2,533 | 7.8 |
| ZM Guadalajara | 4,278 | 18,976 | 7.7 |
| ZM Tijuana | 1,523 | 5,663 | 6.8 |
| ZM Puebla-Tlaxcala | 1,809 | 6,210 | 6.4 |
| ZM Mexicali | 1,730 | 5,821 | 6.3 |
| ZM Valle de México | 29,991 | 84,552 | 5.3 |

Fuente: (IPTD, Intituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, 2012)

Figura 5-6 Parque vehicular en distintas Zonas Metropolitanas de México, 1990-2010

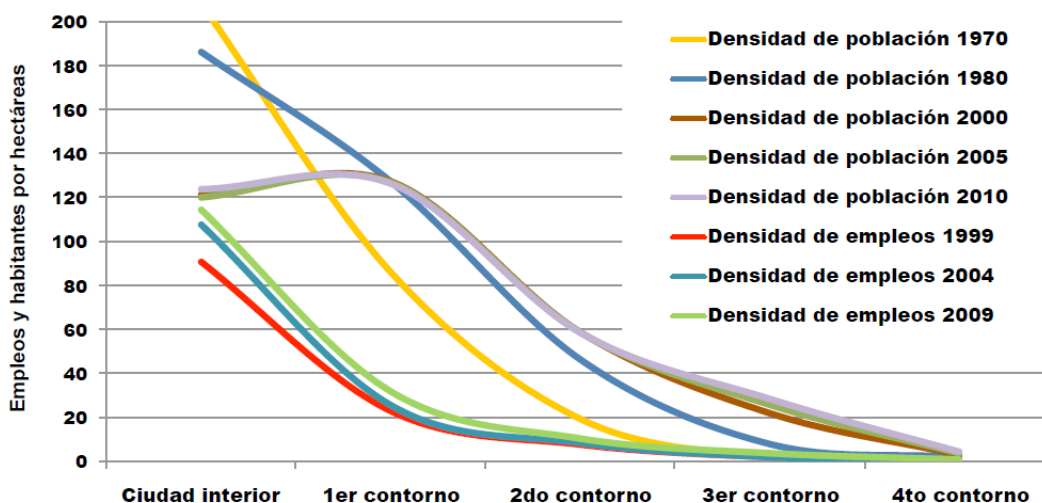


Fuente: (IPTD, Intituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, 2012, pág. 28)

De acuerdo al escenario tendencial de consumo de combustible por el sector transporte de García⁸ con año base 2006, en la ZMVM en el 2020 el consumo será 2.3 veces mayor que el de 2006.

Considerando esta tendencia, junto con la de las actividades comerciales y de servicios en el centro de la ZMVM, ya que a pesar de la expansión de la Ciudad que ha llevado a un despoblamiento del centro y a un incremento de la población en los municipios conurbados la concentración de las actividades económicas se sigue manteniendo en las delegaciones centrales, en donde los espacios de vivienda son sustituidos por espacios comerciales. Así, en la figura 5-7 se muestra como a medida que se incrementa la densidad de empleos en el centro de la Ciudad, la población disminuye ante la presión comercial.

Figura 5-7 Densidad población y de empleos, ZMVM, 1989-2010



Nota: Ciudad Interior: Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza. 1er contorno: Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Álvaro Obregón. 2do. Contorno: Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco, Ecatepec de Morelos, Naucalpan de Juárez, Netzahualcóyotl y Tlalnepantla de Baz. 3er contorno: Cuajimalpa de Morelos, Milpa Alta, Tláhuac, Atizapán de Zaragoza, Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán, Chalco, Chicoloapan, Huixquilucan, Jaltenco, Nicolás Romero, Tecámac, Tultitlan, Cuautitlán Izcalli y Valle de Chalco Solidaridad. 4to contorno: Resto de municipios de la ZMVM.

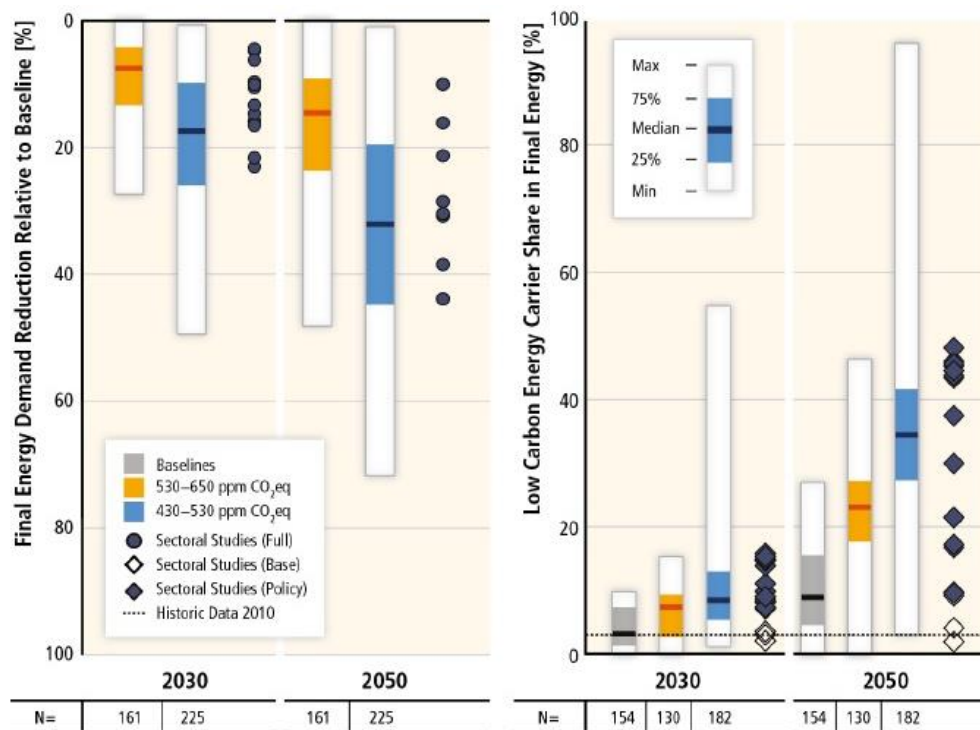
Fuente: (IPTD, Intituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, 2012, pág. 27)

Un resultado de esta distribución espacial de la población con respecto a las fuentes de empleo es el aumento de los tiempos de traslado, pasando de 52 minutos en 1983 a 60 minutos en 2007 (Islas, Hernández, y Blancas, 2004). Lo cual a su vez se traduce en un

⁸ Carmina, García Robles, Tesis Maestría, Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros de la zona metropolitana de la ciudad de México, 2010

mayor número de kilómetros recorridos por automóvil, debido tanto a las distancias como a la congestión vehicular y a los costos del transporte público.

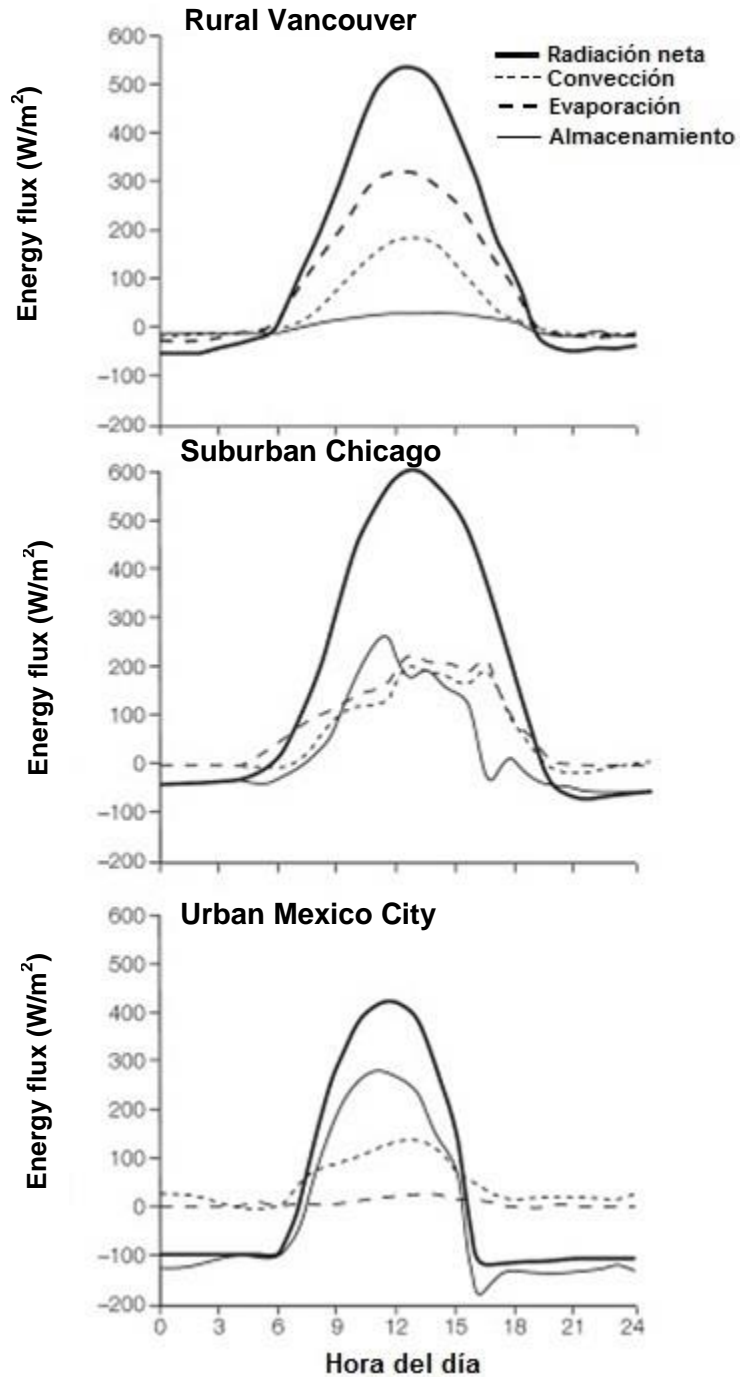
Figura 5-8 Disminución de la demanda energética global por transporte al 2030 y 2050 relativas al escenario base 2010



Nota: Del lado izquierdo se muestra el porcentaje en que podría disminuir la demanda de energía por el transporte, bajo dos escenarios, uno con una concentración global de CO₂ de 530 a 650 partículas por millón (ppm) y otro con una de 430-530 ppm. El lado derecho de la gráfica muestra para estos escenarios el porcentaje de participación de energías bajas en carbono, como electricidad, biocombustibles, etc.
Fuente: (Ottmar, 2013, p. 59)

Considerando las tendencias de crecimiento de las fuentes de calor antropogénico, como el transporte en las distintas zonas metropolitanas, y los efectos que la urbanización puede tener en el balance superficial energético (Figura 5-9), como el aumento de calor almacenado por los distintos materiales de construcción o pavimentación; dentro de una política de sustentabilidad deben considerarse acciones ambientales que tengan como cobeneficio la disminución de la incidencia e intensidad del fenómeno de Isla de Calor Urbana como el uso de transporte público más eficiente para la disminución del empleo de los autos particulares y menor uso de combustibles.

Figura 5-9 Medición del balance de energía diario bajo condiciones de cielo despejado en un área rural de Vancouver (verano 1983), un área suburbana de Chicago (Julio de 1992) y en un área urbana de la Ciudad de México (Diciembre 1993)



Fuente: (Gartland, 2011, pág. 17)

De acuerdo a la figura 5-8, en 2030 y 2050 las tecnologías para el transporte podrían disminuir la demanda energética de un escenario base (2010) entre el 5 y 30 %, estos cambios tecnológicos son indispensables para que el calentamiento global resultante de actividades antropogénicas no tenga un incremento mayor a los 2°C. Sin embargo, en las grandes ciudades podría requerirse una disminución mayor de esta demanda, debido a los efectos locales y regionales en la temperatura superficial.

La subcomponente de calor almacenado del balance energético para la Ciudad de México alcanza valores muy altos ya que se encuentra muy cercana a la subcomponente de radiación neta, por lo que la implementación de medidas o normas de construcción para uso de materiales que disminuyan el almacenamiento de calor tendría un fuerte impacto en la temperatura así como la implementación de techos verdes tendría un efecto directo en la disminución de intensidad de la ICU, disminución de las ondas de calor y en el consumo de energía por el acondicionamiento de temperatura.

El 4 de septiembre de 2013 se publicó la Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 Edificación sustentable – Criterios y requerimientos ambientales mínimos. Esta norma considera propiedades térmicas de los materiales de construcción, como el índice de reflexión solar, que se deben de cumplir así como el aprovechamiento mínimo de energía renovable. Sin embargo habría que enmarcar las normas en una política más amplia de sustentabilidad en ciudades que contemple la edificación, la industria y el transporte.

5.4. Ejemplos de estrategias de mitigación de los efectos del fenómeno de la Isla de Calor Urbana

Entre las estrategias promovidas en las ciudades norteamericanas mediante políticas locales o federales por la Agencia de Protección Ambiental (EPA⁹) están las siguientes:

- Aumento de zonas arboladas y de vegetación
- Techos verdes
- Tecnología de techos frescos
- Tecnología de pavimento fresco

⁹ <http://www.epa.gov/heatisland/mitigation/index.htm>

El transporte como puede verse no es considerado como potencialmente atractivo en la mitigación de la ICU, sin embargo, en otros países como Japón sí es considerado y la política de mitigación se enfoca en las siguientes acciones¹⁰:

- Reducción de las emisiones de calor antropogénico por las actividades urbanas.
 - Facilitar el desarrollo y difusión de vehículos a partir de tecnología de baja emisión.
 - Aplicación de medidas de control de tráfico, con el propósito de hacer un uso racional y distribuido del transporte público.
- Mejora de las superficies urbanas artificiales.
- Mejora de la estructura urbana, como la ubicación u orientación de la edificación y
- Mejora del estilo de vida.

Algunas de estas acciones han sido implementadas en la Ciudad de México con gran aceptación, como las medidas que promueven un uso racional del transporte, como el uso de sistema de autobuses de tránsito rápido (BRT por sus siglas en inglés) que aunque se originó con fines diferentes al de la mitigación del calor de origen antropogénico (como es la mejora de la calidad del aire) constituye una medida con gran potencial para la mitigación de los efectos negativos de la isla de calor urbana.

¹⁰ <http://www.env.go.jp/en/air/heat/heatisland.pdf>

6. CONCLUSIONES

La estimación de la componente antropogénica (Q_F) del balance superficial de la Ciudad de México para 2010, mediante metodologías bottom-up y top-down proporcionó un valor cercano al estimado experimentalmente en 1998 por Oke y Jáuregui de 20 Wm^{-2} , diferencia que está dentro del rango de incertidumbre $22.08 \pm 4.94 \text{ Wm}^{-2}$.

La estimación del perfil horario de Q_F como resultado de las subcomponentes de transporte, industria, residencial, comercial y servicios, así como el metabolismo humano, permite conocer la contribución que cada una de ellas tiene, resultando más significativa la participación del sector transporte.

De acuerdo al perfil horario obtenido para Q_F se observa un incremento considerable en las primeras horas del día, que coincide con el periodo de mayor incidencia de la radiación solar en la Ciudad de México estas características en combinación con las condiciones atmosféricas adecuadas favorecen la formación de la isla de calor urbana y el aumento de la intensidad, que además tiene como principales impactos negativos la inversión térmica y la demanda energética para contrarrestar el discomfort térmico.

También, se observa que la subcomponente dominante en gran parte del día es el transporte, específicamente por el consumo de combustibles, y que puede alcanzar en ciertas horas del día el valor promedio horario calculado para Q_F . Como resultado de ello, se propone que las medidas encaminadas a la mitigación del fenómeno de isla de calor urbana contemplen el transporte como fuente clave de calor antropogénico, principalmente por las tasas de crecimiento que muestra la actividad del sector en la Zona Metropolitana del Valle de México (5.3%).

Los valores alcanzados de Q_F mediante la modelación aquí propuesta, aunque son cercanos al valor estimado experimentalmente por Oke y Jáuregui (1999), pueden estar subestimando significativamente los valores en para algunas áreas de la Ciudad de México, que concentran la mayor densidad de tráfico o de la actividad industrial, pudiéndose hasta duplicar el valor de la fuente de transporte a partir de combustibles fósiles, que representa en promedio el 41.1% del valor de Q_F , en delegaciones del Distrito Federal como Benito Juárez, Cuahútemoc, Gustavo Madero, Iztacalco o Venustiano Carranza, así como en los municipios del Estado de México como Naucalpan de Juárez y

Tlalnepantla, en donde se concentra mas de las dos terceras partes de las emisiones de monóxido de carbono resultado de la combustión de combustibles.

Por otro lado, los máximos locales del perfil horario para Q_F , determinados a las 7, 14 y 18 horas, se encuentran dentro de cada uno de los periodos establecidos por Jáuregui (1997). El máximo local de las 7 horas, que es también el máximo total, está dentro del periodo en donde la isla de calor urbana es más frecuente e intensa en la Ciudad de México, 21 a 10 horas, en este horario la ICU se observa durante la época de secas, así mismo, en este periodo se emite en promedio el 50% del calor antropogénico. El siguiente máximo, 14 horas, está dentro del periodo en donde se observa la ICU diurna, 11 a 15 horas, pero que tiene una menor intensidad de 3 a 5 °C y con duración relativamente menor. Así mismo, en este periodo se emite en promedio el 26 % del calor antropogénico generado a lo largo del día.

El último máximo local, registrado a las 18 horas, está dentro del periodo tarde-noche comprendido de 16 a 20 horas y en el que la ICU tiene una intensidad de entre 4 y 5 °C, y que se observa tanto en época de secas como de lluvia. También, dentro de este periodo se emite en promedio el 24% del calor antropogénico.

La componente de calor antropogénico estimada para la Ciudad de México es muy parecida a la estimada para Los Ángeles o para Berlín, de 21 Wm^{-2} . Y en comparación a estas ciudades, la radiación neta (Q^*) es menor, de 39 Wm^{-2} (Oke *et al.*, 1999), contra 108 y 57 Wm^{-2} en Los Ángeles y Berlín respectivamente.

Por último, cabe hacer mención que las referencias utilizadas sobre la climatología de la Ciudad de México son escasas y relativamente viejas, y más aún aquellas que tratan concretamente el tema de balance energético superficial, en comparación con las referencias encontradas para ciudades europeas o de los EE.UU., ya que no se producen estudios con la periodicidad requerida para los cambios y retos climáticos que enfrenta la Ciudad de México.

Posibles mejoras para la estimación de Q_F

La estimación de Q_F mediante este ejercicio permitirá su integración en modelos climáticos locales o regionales. Por lo que su estimación requerirá de una sistematización que permita generar una serie de tiempo consistente que en el corto plazo puede

permanecer acorde a los perfiles horarios de las emisiones de las fuentes incluidas, ya que este planteamiento no requiere de la generación de información adicional.

La estimación de la componente antropogénica del balance superficial del clima urbano la Ciudad de México en una menor resolución, tanto temporal como espacial, proporcionará las bases para un desarrollo urbano integral de la Ciudad de México y en general de las zonas metropolitanas o regiones en proceso de urbanización.

Además de las fuentes antropogénicas de calor incluidas en este ejercicio se tiene que el uso de energía eléctrica para bombeo de agua y para alumbrado público son significativos, por lo que su inclusión podrá generar una estimación de Q_F más exacta.

En esta tesis se consideró una eficiencia de la formación de calor sensible a partir de los procesos de combustión del 100%, sin embargo es importante considerar también la generación de calor latente a partir de estas fuentes, ya que aunque este producto eventualmente se convertirá en calor sensible es importante su consideración para obtener perfiles horarios más acordes con los procesos reales.

Otra mejora futura consiste en la consideración de los procesos de transferencia del calor generado al interior de la edificación, ya que los materiales utilizados en la construcción pueden hacer que este proceso se realice a tasas muy diferentes debido a sus propiedades termales. En este sentido, es importante conocer las características de la edificación en la Ciudad de México, de manera que se puedan caracterizar sus consumos energéticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asimakopoulos, D. (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. Londres: James & James.
- Bach, W. (1970). An urban circulation model. *Aech. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser B.*, 155-168.
- Bailey, W., y Davies, J. (1981). Atmospheric and surface control on evapotranspiration during soybean maturation. *Boundary-Layer Meteorology*, 20, 417-428.
- Block, A., Keuler, K., y Schaller, E. (2004). Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns. *Geophysical Research Letters*, 31.
- Bowling, S., y Benson, C. (1978). *Study of the subarctic heat island at Fairbanks, Alaska*. Geophysical Institute. US EPA.
- Castillejos, J. (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- CFE, (2011). *Curvas de demanda de energía eléctrica*. Solicitud de información a la Subdirección de Generación.
- Chandler, T. J. (1965). *The Climate of London*. London: Hutchinson.
- Chávez, B., y Sheinbaum, P. (2014). Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area. *Energy*.
- Clark, E. C., R. D. Bornstein, and Y. T. Tam (1985), Current and potential anthropogenic moisture effects on the New York City planetary boundary layer, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 35, 831– 835.
- EPA. (2005). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics*.
- Estes, M. G. (1999). The Urban Heat Island Phenomenon and Potential Mitigation Strategies.
- Fan et al, H., y Sailor, D. (2005). Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 73-84.
- Fan, H., y Sailor, D. (2005). Modelin the Impacts of Anthrhopogenic Heating on the Urban Climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environmen*. 39, 73-84.
- Flanner, M. (2009). Integrating anthropogenic heat flux with global climate. *Geophysical Research Letters*, 36(2).
- Fujino, T., Asaeda, T., Wake, A., 1996. Numerical experiment on the characteristics of temperature distribution in metropolitan areas in summer. *Geographical Review of Japan*, Series A, 69A, 817-831.
- Gartland, L. (2011). Causes of the heat islands. En *Heat Islands Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. Londres: Earthscan.
- Godowitch, J. (1986). Characteristics of vertical turbulent velocities in the urban boundary layer. *Boundary layer Meteo*(35), 387-407.
- Grimmond, C., Roth, M., y Oke, T. R. (2010). Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences*(1), 247-274.
- Grimmond, S. (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*, 481-497.

- Hamilton, I. *et al.* (2009). The significance of the anthropogenic heat emissions of London's Buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation. *Building and Environment*, 44(4), 807-817.
- Harrison, R., McGoldrick, B., y Williams, C. (1984). Artificial heat release from greater London (1971-1976). *Atmospheric Environmental*, 18(11), 2291-2304.
- Hinkel, K. M. *et al.* (2003). The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *International Journal of Climatology*, 1889-1905.
- Hiramatsu, N., Hanaki, K., Matsuo, T., 1992. Comparison of energy consumption among seven major cities in Japan. *Environmental Systems Research* 20, 252}261 (in Japanese with English abstract).
- Huang, Y. J., Akbari, H., Rainer, L., y Ritscjard, R. (1991). *Prototypical commercial buildings for 20 urban market areas*. Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division, Berkeley Ca.
- Iamarino, M., Beevers S., y Grimmond, C. (2011). High-resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970-2025. *International Journal of Climatology*, 32(11).
- Ichinose, T., Hanaki, K., y Matsuo, T. (1994). Analyses on geographical distribution of urban anthropogenic heat based on very precise geographical information. *Proceedings of Environmental Engineering Research*, 263-273.
- Ichinose, T., Shimodozono, K., y Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate. *Atmospheric Environment*, 33(24-24), 3897-3909.
- INE, (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. México, D.F.
- INEGI. (2012). *Marco Geoestadístico Nacional actualizado al Censo de Población y Vivienda 2010*. México, D.F.: INEGI.
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC, (2000). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Suiza.
- IPCC, (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3: Reference Manual*. United Kingdom
- IPTD, Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo. (2012). La importancia de reducción del uso del automóvil en México. México.
- Islas, V., Hernández, S., y Blancas, S. (2004). *El transporte en la región centro de México, Vol. 1, Diagnóstico general*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Jáuregui, E. (1991). El clima urbano y su relación con los contaminantes del aire. 50-52.
- Jáuregui, E. (1992). La isla de calor urbana de la Ciudad de México a finales del siglo XIX. 39.
- Jáuregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831.
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México* (1a ed.). México, México: Instituto de Geografía-UNAM y Plaza y Valdez.
- Jáuregui, E., y Martínez, A. (2000). On the environmental role of urban lakes in Mexico City. *Urban Ecosystems*, 145-166.
- Kato, S., y Yamaguchi, Y. (2005). Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible flux. *Remote Sensing of Environment*, 44-54.
- Klikegawa, Y. *et al.* (2003). Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings energy-demands. *Applied Energy*, 449-466.

- Kimura, F., y Takahashi, S. (1991). The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment. *Atmospheric Environment*, 155-164.
- Klysik, K. (1996). Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heatemissions in Lodz, Poland, *Atmos. Environ.*, 30, 3397– 3404.
- Klysik, K., y Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lódz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 3885-3895.
- Kouridis, C. (2009). *Uncertainty estimates and guidance for road transport emission calculations*. Thessaloniki: Comisión Europea.
- Laat, A. T., y Maurellis, A. N. (2006). Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends. *International Journal of Climatology*, 897–913.
- Landsberg, H. (1981). *The Urban Climate*. London: Academic Press INC.
- Lee, D. (1979). Contrastas in warming and cooling rates at an urban and a rural site. *Weather*, 34(2), 60-66.
- Lee, D. (1984). Urban Climates. *Physical Geography*, 1-31.
- Lee, S., y Baik, J. (2010). Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theoretical and Applied Climatology*, 100(1-2), 227-237.
- Ludwig, F. (1970). Urban air temperatures and their relation to extrurban meteorologil measurements,. *Amer. Soc. Heat. Refrig. Air-Cond. Eng.*, 40-45.
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy balance in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology* 94: 357–397.
- Montávez, J. P., Rodríguez, A., y Jiménez, J. I. (2000). A study of the urban heat island of Granada. *International journal of Climatology*, 20, 899-911.
- Mulás, P. (2005). *Prospectiva sobre la utilización de las energías renovables en México. Una visión al año 2030*. SENER, Secretaría de Energía.
- Offerle, H., Grimmond, C. B., y Fortuniak, K. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central european city centre. (H. Offerle, Ed.) *International Journal of Climatology*, 1405-1419.
- Ohashi, Y. et al. (2007). Influence of air-conditioning waste on air temperature in Tokyo office areas during summer: numerical experiments using an Urban Canopy Model coupled with a building energy model. *Journal Appl Meteorology and Climatology*, 46, 66-81.
- Oke, T. (1978). Surface heat fluxes and the urban boundary layer. *WMO Simposium on Boundary Layer Physics Applied to Specific Problems of Air pollution*, 63-69.
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1-24.
- Oke, T. (1987). *Boundary layer climates, 2nd ed.* Cambridge: University press, Cambridge.
- Oke, T. et al. (1991). Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary Layer Meteorology*, 339-358.
- Oke, T., y Zeuner, G. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 433-444.
- Oke, T. y Jáuregui, E. (1999). The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric environment*, 33, 3919-3930.
- Ospina, J., Gay, C., y Conde, A. (2013). *Historia del Clima de la Ciudad de México: Efectos Observados y Perspectivas, (En imprenta)*, México, D.F., México.
- Ottmar Edenhofer, C. S.-M. (2013). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (Technical Summary)*. IPCC.
- Pigeon, G. et al. (2007). Implementation of an urban canopy parametrization in a mesoscale meteorological model. *International Journal of Climatology*, 1969-1981.

- Piringer, M. *et al.*, (2002). Investigating the surface energy balance in urban areas - Recent advances and future needs. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1-16.
- PNUMA. (2010). *The emission gap report (Informe sobre la disparidad en las emisiones de GEI)*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Sailor, D. (2004). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38, 2737-2748.
- Sailor, D. (2004). The importance of including anthropogenic heating in mesoscale modeling of the urban heat island. *84th annual meeting of the AMS, Symposium on Planning, Nowcasting, and forecasting in the Urban Zone*.
- Sailor, D. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 189-199.
- Sailor, D., y Fan, H. (2006). An anthropogenic heating for major U.S. cities. *American Meteorological Society, 6th Symposium on the Urban Environment*.
- Sailor, D., y Lu, L. (2004). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38(17), 2737-2748.
- Sailor, D. *et al.* (2007). A bottom-up approach for estimating latent and sensible heat emissions from anthropogenic sources. *7th Symposium on the Urban Environment*.
- Sailor, D., Hart, M., y Heiple, S. (2008). A bottom-up approach for estimating latent and sensible heat emissions from anthropogenic sources. *7th Symposium on the Urban Environment*.
- Sandrine, A., y Mestayer, P. G. (1995). Climatology of cities. En A. Gyr, *Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Meso-scale Flow Fields* (págs. 165-189). Netherlands: Kluwer the language of science.
- SEDESOL. (2012). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010*. México: Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de la Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- SENER, (2013). *Balance Nacional de Energía 2012*.
- Shahmohamadi, P. (2010). The Link between Urbanization and Climatic Factors: A Concept on Formation of Urban Heat Island. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 754-768.
- Shahmohamadi, P. (2011). The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 754-768.
- SMA, (2000). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 1998*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal.
- SMA, (2002). *Inventario de Emisiones a la Atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México 2000*. México, D.F.: SMA.
- SMA, (2004). *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002*. México: SMA DF.
- SMA, (2012). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México: Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del D.F.
- Smith, C., Lindley, S., y Levermore, G. (2009). Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: the case of manchester. *Theoretical and Applied Climatology*, 98(1-2), 19-35.
- Solís, J., y Sheinbaum, C. (2013). Energy consumption and greenhouse gas emission trends in Mexican road transport. *Energy for Sustainable Development*, 280-287.
- Stone, B. (2007). Urban and rural temperature trends in proximity to large. *International Journal of Climatology*, 1801-1807.

- Sundborg, A. (1952). Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 78(338), 653-654.
- Taha, H. (1977). The effect of localized man-made heat and moisture sources in mesoscale weather modification. *Energy and Climate*, 96-105.
- Taha, H. (1991). Heat Island and Oasis Effects of Vegetative Canopies: Micro-Meteorological Field-Measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 123-138.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, 99-103.
- Taha, H., Sailor, D., y Akbari, H. (1992). *High-Albedo Materials for Reducing Building Cooling Energy Use*. California: Lawrence Berkeley Lab., CA (United States).
- Tejeda, A., y Jáuregui, E. (2005). Surface energy balance measurements in the México City region: a review. *Atmósfera*, 1-23.
- Torrance, K., y Gutman, D. (1975). Response of the urban boundary layer to heat addition and surface roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 9(2), 217-233.
- Unwin, D. (1980). The synoptic climatology of Birmingham's urban heat island 1965-74. *Weather*, 25(2), 43-50.
- Weng, Q., y Yang, S. (2004). Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*, 70, 145-156.

ANEXO

I. Modelación de emisiones de fuentes móviles

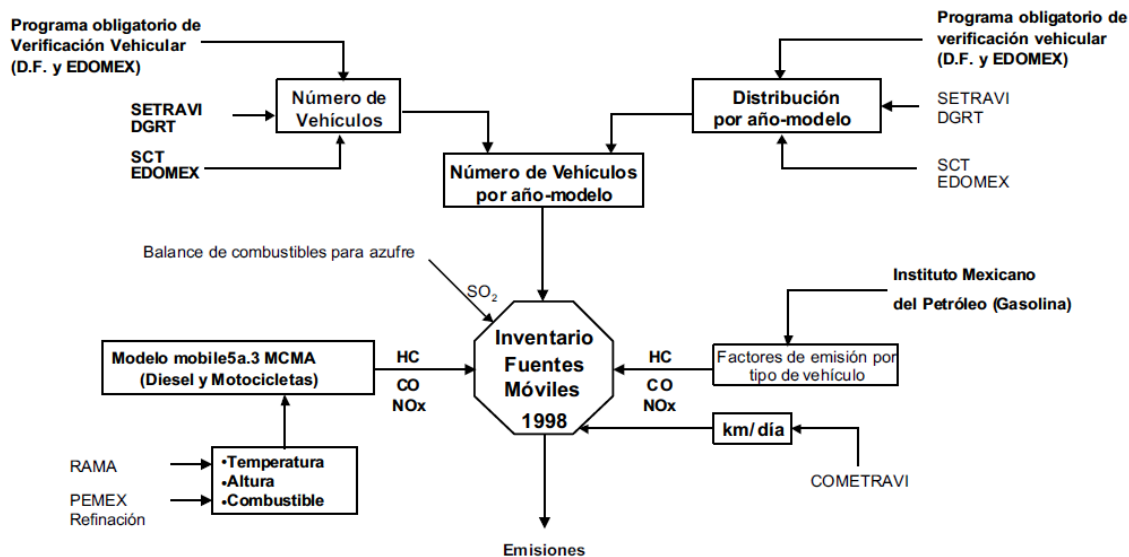
Para la estimación de las emisiones de HC, NO_x y CO en los vehículos, de acuerdo a SMA (2012) se utilizó el Modelo de Emisión (mecánico) MOBILE5a.3MCMA, desarrollado por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (USEPA) y adaptados para utilizarse en México.

Para los vehículos automotores, los datos de actividad son representados por los kilómetros recorridos por vehículo (KVR), que es la distancia total recorrida por los vehículos automotores dentro del dominio espacial del inventario; mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramos de contaminante emitido por KVR.

Las estimaciones de KVR deben ser desarrolladas directamente a partir de datos locales tales como modelos de transporte o conteos de tráfico en circulación. Sin embargo, en muchos casos, estos datos no están disponibles y surge la necesidad de estimar la actividad vehicular con base en parámetros alternos, tales como las estadísticas del consumo regional de combustible. Los factores de emisión deben estimarse utilizando un modelo de factor de emisión que haya sido ajustado para las condiciones locales.

Las emisiones pueden obtenerse mediante factores de emisión, medición en la fuente, balance de materiales y los modelos de emisiones.

Figura I-1 Interacciones de las fuentes de información de las variables que intervienen en el cálculo de las emisiones de fuentes móviles



Fuente: (SMA, 2004)

Por ejemplo, el método de factores de emisión para el CO puede describirse como (IPCC, 1996):

$$E = \sum (FE_{ab} * A_{ab}) \quad \text{Ecuación I-1}$$

Por ejemplo, para fuentes móviles se tiene:

E : Son las emisiones.

Los subíndices sirven para la caracterización de la flota vehicular:

a : Es el tipo de vehículo

b : Es el año modelo

FE_{ab} : Es el factor de emisión de masa de CO por kilómetro recorrido (g/km)

A_{ab} : Es la actividad es el recorrido anual por tipo de vehículo y año modelo (km)

Otra forma de estimar la subcomponente antropogénica del transporte a partir de las emisiones de CO es la siguiente: Por ello estimamos el consumo de combustibles para toda la región de estudio de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{FV} = \frac{\sum \left[\frac{E(t)_i}{(FE_{ij} * R_{ij})} * Pc_k \right]}{A * 3600} \quad \text{Ecuación I-2}$$

Donde:

$E(t)_i$: Son las emisiones de monóxido de carbono (CO) por hora t y por tipo de transporte i (Tabla I-1)

FE_{ij} : Es el factor de emisión de CO por tipo de transporte i y año modelo j (Tablas I-3 e I-4)

R_{ij} : Es el rendimiento del combustible por tipo de transporte i y año modelo j (Tabla 4-13)

Pc_k : Es el poder calorífico del combustible k (Tabla 4-15)

A : Es el área de la Ciudad de México con uso de suelo urbano (Tabla 4-1)

Tabla I-1 Emisiones de CO por tipo de vehículo en la ZMVM, 2010

| Tipo de transporte | Emisiones totales de CO |
|-------------------------------------|-------------------------|
| | ton/año |
| Autos particulares | 429,417.65 |
| SUV | 152,601.00 |
| Taxis (subcompactos) | 225,742.00 |
| Combis (SUV) | 91,492.00 |
| Microbuses (SUV) | 108,449.00 |
| Pick up (SUV) | 179,420.00 |
| Autobuses | 46,226.00 |
| Vehículos de carga hasta 3.8t (SUV) | 9,883.00 |
| Vehículos carga > 3.8t | 150,124.00 |
| Motocicletas | 147,189.00 |
| Metrobús | 103.00 |
| Tractocamiones | 22,818.00 |
| Total | 1,563,464.65 |

Fuente: (SMA, 2012, pág. 22)

Tabla I-2 Poder calorífico del combustible para vehículos, 2010

| Combustible | Poder calorífico |
|-------------|------------------|
| | MJ/l |
| Gasolina | 32.41 |
| Diésel | 35.71 |

Fuente: (SENER, 2013)

Tabla I-3 Factores de emisión de CO año modelo a gasolina para la ZMVM, 2010

| Año Modelo | Factores de emisión para CO [g/km] | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------------------|-------|------------------|-----------------|--------|-----------------------|-----------------|----------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------|-------|
| | Gasolina | | | | | | | | | | | | | |
| | AP | TAX | SUV-PU1 (0-1.7t) | PU 2 (1.8-2.3t) | CO | V≤3.8t PU3 (2.4-2.6t) | PU 4 (2.7-3.6t) | MIC | V >3.8t (4.6-6.3t) | V >3.8t (6.4-11.7t) | V >3.8t (11.8-14.9t) | V >3.8t (15-27.2t) | AUT | MC |
| 1986 y ant. | 47.22 | 39.8 | 104.66 | 138.93 | 168.98 | 103.93 | 102.25 | 1,024.93 | 434.11 | 376.87 | 268.46 | 268.46 | 895.95 | 54 |
| 1987 | 43.06 | 39.8 | 83.24 | 123.66 | 134.49 | 84.2 | 81.12 | 916.1 | 397.73 | 376.87 | 254.68 | 254.68 | 795.87 | 52.34 |
| 1988 | 29.19 | 39.8 | 51.2 | 71.28 | 80.45 | 52.12 | 50.49 | 257.21 | 146.23 | 376.87 | 129.01 | 129.01 | 222.37 | 49.59 |
| 1989 | 20.7 | 39.8 | 29.8 | 44.07 | 50.74 | 32.25 | 30.85 | 231.01 | 125.9 | 119.37 | 105.65 | 105.65 | 199.54 | 47.98 |
| 1990 | 16.9 | 39.8 | 27.2 | 39.25 | 46.32 | 29.04 | 27.83 | 208.56 | 101.19 | 119.37 | 71.67 | 71.67 | 298.73 | 46.37 |
| 1991 | 16.2 | 39.8 | 25.74 | 35.17 | 42.94 | 27.59 | 26.13 | 101.92 | 66.67 | 119.37 | 62.79 | 62.79 | 145.21 | 44.76 |
| 1992 | 15.74 | 39.8 | 23.25 | 31.16 | 42.11 | 24.97 | 23.56 | 98.97 | 65.67 | 67.21 | 62.59 | 62.59 | 140.96 | 43.15 |
| 1993 | 15.26 | 39.51 | 21.68 | 29.49 | 41.06 | 23.54 | 21.99 | 67.99 | 40.84 | 67.21 | 34.43 | 34.43 | 95.79 | 41.53 |
| 1994 | 14.72 | 39.33 | 20.89 | 28.47 | 40.99 | 23.02 | 21.2 | 65.5 | 40.06 | 41.34 | 34.02 | 34.02 | 91.76 | 39.92 |
| 1995 | 14.12 | 38.16 | 19.98 | 25.97 | 40.96 | 21.99 | 20.47 | 63.29 | 39.28 | 40.53 | 33.6 | 33.6 | 88.22 | 38.3 |
| 1996 | 13.71 | 36.62 | 19.37 | 26.5 | 40.81 | 21.4 | 19.64 | 61.02 | 38.49 | 39.7 | 33.18 | 33.18 | 87.2 | 36.68 |
| 1997 | 13.36 | 36.73 | 18.93 | 24.42 | 40.56 | 20.63 | 19.08 | 58.89 | 37.7 | 38.88 | 32.73 | 32.73 | 83.61 | 35.07 |
| 1998 | 13.02 | 35.69 | 18.45 | 23.75 | 38.67 | 19.8 | 18.86 | 56.83 | 36.9 | 38.04 | 32.26 | 32.26 | 79.55 | 33.45 |
| 1999 | 12.67 | 32.98 | 17.91 | 22.38 | 36.92 | 18.87 | 18.31 | 54.65 | 36.1 | 37.2 | 31.88 | 31.88 | 75.49 | 31.84 |
| 2000 | 12.21 | 30.2 | 17.22 | 20.93 | 35.36 | 17.71 | 17.33 | 52.44 | 35.29 | 36.34 | 31.44 | 31.44 | 71.42 | 30.23 |
| 2001 | 11.35 | 27.49 | 15.93 | 19.32 | 32.58 | 16.41 | 15.73 | 50.07 | 34.29 | 35.3 | 30.92 | 30.92 | 67.21 | 28.6 |
| 2002 | 10.42 | 24.78 | 14.56 | 18.69 | 29.98 | 14.93 | 14.76 | 47.67 | 32.72 | 33.74 | 30.34 | 30.34 | 62.89 | 26.97 |
| 2003 | 9.97 | 22.06 | 13.95 | 16.97 | 27.08 | 14.13 | 14.02 | 45.26 | 31.14 | 32.18 | 29.71 | 29.71 | 58.78 | 25.37 |
| 2004 | 9.51 | 19.38 | 13.34 | 15.94 | 23.97 | 13.74 | 13.43 | 42.8 | 29.55 | 30.61 | 29.09 | 29.09 | 54.58 | 23.75 |
| 2005 | 9.02 | 16.67 | 12.71 | 15.66 | 20.88 | 12.96 | 12.63 | 40.25 | 27.97 | 29.03 | 28.45 | 28.45 | 49.92 | 22.13 |
| 2006 | 8.53 | 13.57 | 12.08 | 14.97 | 17.13 | 12.35 | 11.68 | 37.45 | 26.38 | 27.45 | 28.06 | 28.06 | 44.29 | 20.52 |
| 2007 | 8.03 | 10.55 | 11.33 | 14.83 | 13.54 | 11.44 | 10.45 | 34.65 | 25 | 26 | 27.76 | 27.76 | 42.6 | 18.9 |
| 2008 | 7.47 | 7.75 | 10.46 | 15.32 | 10.07 | 10.08 | 9.53 | 30 | 23.8 | 24.66 | 27.45 | 27.45 | 37.74 | 17.29 |
| 2009 | 7.34 | 6.24 | 10.24 | 13.92 | 7.62 | 10.43 | 12.43 | 25.19 | 22.52 | 23.14 | 27.18 | 27.18 | 36.3 | 15.66 |
| 2010 | 7.16 | 3.39 | 9.96 | 10.92 | 4.21 | 14.94 | 0 | 22.3 | 21.71 | 22.37 | 26.98 | 26.98 | 32.62 | 14.43 |

Nota: Los factores de emisión utilizados para el cálculo de CO están basados en la metodología US EPA.

Fuente: (SMA, 2012, págs. A-14)

Tabla I-4 Factores de emisión de CO año modelo a diésel para la ZMVM, 2010

| Año Modelo | Diésel | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|-----------------|-------------------------|-------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------|-------|---------|------|
| | AP | SUV PU (0-2.3t) | CO V≤3.8t PU (2.4-3.6t) | MIC | V >3.8t (4.6-6.3t) | V >3.8t (6.4-11.7t) | V >3.8t (11.8-14.9t) | V > 3.8t (15-27.2t) | TRA | AUT | AUT ESC | MB |
| 1986 y ant | 2.62 | 6.32 | 6.11 | 37.04 | 24.54 | 24.67 | 26.91 | 40.54 | 42.34 | 50.19 | 24.46 | 5.51 |
| 1987 | 2.08 | 3.5 | 3.5 | 36.61 | 24.26 | 24.67 | 26.63 | 39.91 | 41.87 | 49.72 | 24.17 | 5.51 |
| 1988 | 1.75 | 3.25 | 3.25 | 36.01 | 24.06 | 24.67 | 26.39 | 39.34 | 41.54 | 49.32 | 23.91 | 5.51 |
| 1989 | 1.79 | 3.11 | 3.11 | 35.5 | 23.91 | 24.43 | 26.16 | 38.91 | 41.27 | 49.3 | 23.8 | 5.51 |
| 1990 | 1.63 | 2.9 | 2.9 | 34.36 | 23.56 | 24.09 | 26.04 | 38.54 | 41.11 | 48.97 | 23.6 | 5.51 |
| 1991 | 1.59 | 2.99 | 2.99 | 9.04 | 4.95 | 24.09 | 10.77 | 17.77 | 20.49 | 13.6 | 14.61 | 5.51 |
| 1992 | 1.52 | 2.96 | 2.96 | 8.78 | 4.87 | 6.14 | 10.76 | 10.37 | 11.54 | 13.59 | 14.52 | 5.51 |
| 1993 | 1.5 | 2.95 | 2.95 | 8.15 | 6.14 | 6.14 | 10.92 | 13.31 | 14.73 | 19.8 | 13.19 | 5.51 |
| 1994 | 1.43 | 2.93 | 2.93 | 7.99 | 6.09 | 7.47 | 10.91 | 13.29 | 14.7 | 19.73 | 13.13 | 5.51 |
| 1995 | 1.39 | 2.98 | 2.98 | 7.85 | 6.05 | 7.42 | 10.91 | 13.27 | 14.67 | 19.66 | 13.07 | 5.51 |
| 1996 | 1.45 | 3.02 | 3.02 | 7.7 | 6.01 | 7.37 | 10.9 | 13.25 | 14.64 | 19.55 | 13.01 | 5.51 |
| 1997 | 1.33 | 2.86 | 2.86 | 7.57 | 5.96 | 7.36 | 10.89 | 13.22 | 14.61 | 19.44 | 12.95 | 5.51 |
| 1998 | 1.36 | 2.77 | 2.77 | 7.45 | 5.92 | 7.32 | 10.88 | 13.2 | 14.58 | 19.38 | 12.89 | 5.51 |
| 1999 | 1.39 | 2.78 | 2.78 | 7.35 | 5.88 | 7.26 | 10.87 | 13.17 | 14.55 | 19.3 | 12.83 | 5.51 |
| 2000 | 1.39 | 2.59 | 2.59 | 7.21 | 5.83 | 7.21 | 10.86 | 13.15 | 14.51 | 19.22 | 12.76 | 5.51 |
| 2001 | 1.41 | 2.43 | 2.43 | 7.03 | 5.78 | 7.15 | 10.84 | 13.12 | 14.48 | 19.11 | 12.68 | 5.51 |
| 2002 | 1.36 | 2.37 | 2.37 | 6.87 | 5.74 | 7.09 | 10.82 | 13.09 | 14.45 | 18.97 | 12.59 | 5.51 |
| 2003 | 1.3 | 2.36 | 2.36 | 6.69 | 5.69 | 7.03 | 10.8 | 13.06 | 14.42 | 18.84 | 12.52 | 5.51 |
| 2004 | 1.3 | 2.32 | 2.32 | 6.52 | 5.65 | 6.97 | 10.77 | 13.03 | 14.39 | 18.69 | 12.44 | 5.51 |
| 2005 | 1.22 | 2.22 | 2.22 | 6.37 | 5.6 | 6.91 | 10.75 | 13 | 14.36 | 18.56 | 12.37 | 5.51 |
| 2006 | 1.21 | 2.07 | 2.07 | 6.2 | 5.56 | 6.84 | 10.73 | 12.97 | 14.33 | 18.41 | 12.29 | 5.51 |
| 2007 | 1.18 | 2.06 | 2.06 | 6.05 | 5.56 | 6.78 | 10.71 | 12.95 | 14.3 | 18.27 | 12.22 | 5.51 |
| 2008 | 1.15 | 2.03 | 2.03 | 5.88 | 5.56 | 6.72 | 10.68 | 12.92 | 14.27 | 18.12 | 12.14 | 5.51 |
| 2009 | 1.11 | 2.02 | 2.02 | 5.72 | 5.56 | 6.66 | 10.65 | 12.89 | 14.23 | 17.97 | 12.05 | 5.51 |
| 2010 | 1.12 | 1.98 | 1.98 | 5.59 | 5.56 | 6.61 | 10.64 | 12.87 | 14.21 | 17.84 | 11.99 | 5.51 |

Fuente: (SMA, 2012, págs. A-14)

