



## METABOLISMO ENERGÉTICO DE LA ZONA METROPOLITANA DE TOLUCA, MÉXICO

**Dainiz Noray Montoya García**

Escuela Superior de Ingeniería e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional, México  
[dmontoyag83@gmail.com](mailto:dmontoyag83@gmail.com)

**Salvador Adame Martínez**

Facultad de Planeación de la Urbana de la Universidad Autónoma del Estado de México  
[adame\\_ms@yahoo.com](mailto:adame_ms@yahoo.com)

**Edel G. Cadena Vargas**

Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México  
[ecadenav@uaemex.mx](mailto:ecadenav@uaemex.mx)

**Verónica Martínez Miranda**

Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México  
[vmartinezm685@profesor.uaemex.mx](mailto:vmartinezm685@profesor.uaemex.mx)

**Cristian Julián Díaz Álvarez**

Corporación Universitaria del Meta, Colombia  
[cristian.diaz@unimeta.edu.co](mailto:cristian.diaz@unimeta.edu.co)

### Resumen

La ZMT es una zona urbana, similar a una máquina térmica que cuya lógica de crecimiento, no respeta las leyes de la termodinámica, ya que los altos consumos de energéticos y su alta ineficiencia demuestran generación de entropía, manifestada en elevadas emisiones de contaminantes, movilidad deficiente, islas de calor y disminución de la calidad de vida de sus habitantes. Este trabajo analiza el metabolismo energético de la ZMT, a partir del Análisis de Flujos de Materiales y Energía tomando en cuenta datos estadísticos y cálculos matemáticos, lo que llevó a establecer que esta zona es termodinámicamente vulnerable. Se evidenció que el consumo en energía eléctrica se incrementó en un 38.70%, y el consumo de combustible un 53.61%, las emisiones por electricidad 5.12% y por combustible 52.78%, lo que lleva a concluir que de seguir bajo este patrón de consumo el colapso termodinámico serán inminente. Se abre entonces la oportunidad de que las políticas públicas junto con los planes de urbanización consideren indispensables los estudios metabólicos, buscando la gestión de la entropía para garantizar una mejor calidad de vida de sus habitantes.

**Palabras clave:** consumo energético, crecimiento urbano, entropía urbana, metabolismo urbano, termodinámica.

### Abstract

The ZMT is an urban area, like a thermal machine whose growth logic does not respect the laws of thermodynamics, since the high energy consumption and its high inefficiency shows entropy generation, manifested in elevated emissions of pollutants, poor mobility, heat islands and decreased quality of life



of its inhabitants. This work analyzes the energy metabolism of the ZMT, based on the Analysis of Material and Energy Flows considering statistical data and mathematical calculations, which led to set up that this area is thermodynamically vulnerable. It was showed that electricity consumption increased by 38.70%, and fuel consumption by 53.61%, emissions by electricity 5.12% and by fuel 52.78%, which leads to the conclusion that if this consumption pattern continues, thermodynamic collapse will be imminent. This opens the opportunity for public policies, together with urbanization plans, to consider metabolic studies as indispensable, looking to manage entropy to guarantee a better quality of life for its inhabitants.

**Keywords:** energy consumption, urban entropy, urban growth, urban metabolism, thermodynamics.

**JEL Codes:** Q56, R11



## 1. Introducción

La Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) es una zona urbana estratégica en la actualidad por sus actividades económicas e industriales en México, ya que junto a la Zona Metropolitana del Valle de México aportan alrededor de una tercera parte del PIB nacional (Rendón y Godínez 2016), por tanto, es un escenario de significativos fenómenos sociales, urbanos e industriales fundamentales en la economía mexicana.

Como referente histórico, a principios del siglo pasado, el Valle de Toluca era el principal abastecedor de granos y alimentos para la ciudad de México, por ende, las actividades económicas eran meramente primarias, coexistiendo con algunas actividades industriales textiles, molinos, alfareras, cerveceras en la ciudad de Toluca (Liévanos y Villar 2015). En 1941 con el decreto de la Ley de Protección a las Industrias Nuevas y Necesarias el sector secundario se empezó a consolidar al atraer con incentivos fiscales inversiones principalmente de la Ciudad de México, lo que inició la construcción de vías de comunicación e infraestructura urbana. Entre 1946 y 1950, fue necesario expropiar suelos ejidales para no interrumpir la expansión industrial (Iglesias 2019), bajo una débil política que considerara todos los requerimientos para ello tales como: condiciones de drenaje, agua potable, electrificación, zonificación y vías de acceso y una urbanización ordenada (Aranda 2000).

Entre 1961 y 1975, con el establecimiento de empresas en suelos semiurbanos y rurales, se dieron las condiciones para la consolidación del sector secundario en Toluca y Lerma; se comenzó la construcción de parques industriales siendo el más importante, el corredor industrial Ocoyoacac-Lerma-Toluca, afectando principalmente a los municipios aledaños (Iglesias 2019).

Al mismo tiempo que se impulsaba la industria, las actividades terciarias se desarrollaron, especialmente el comercio, con el crecimiento

de almacenes comerciales (Aranda 2000), lo que modificó el patrón urbano de Toluca y de los municipios aledaños; al iniciarse un proceso de integración funcional entre Toluca, Metepec y Lerma (1970) y posteriormente con Zinacantepec (1980), conformándose nuevas subcentralidades en una naciente zona metropolitana (Aranda 2005).

En 1983, con el Plan de Desarrollo Urbano del Estado de México, se definió el “Sistema Urbano del Valle de Toluca-Lerma” conformado por áreas urbanas de Toluca, Lerma, Ocoyoacac, Tianguistenco, Capulhuac, Jalatlaco, Metepec, Tenango de Arista, Zinacantepec, San Mateo Atenco, Mexicaltzingo, Almoloya de Juárez y Xonacatlán. Es decir, trece municipios que considerados como un “sistema”, lo que supone un conjunto de funciones interdependientes, con un centro político-administrativo que era Toluca (Montoya 1995).

En 2004, la Secretaría de Desarrollo Social, el Instituto Nacional de Geografía e Informática y el Consejo Nacional de Población establecieron los criterios para la conformación de las zonas metropolitanas de México y con ello se configuró geográfica y políticamente la ZMT (SEDESOL 2004). Desde 2015, quedó integrada por 16 municipios a saber (Figura 1): Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Oztolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec. Se ubica en la zona centro de México, cuenta con una superficie de 2,410.5 km<sup>2</sup>, con una población de 2,202,886 habitantes, que corresponde al 13.1% de la población total del Estado de México y tiene una tasa de crecimiento de 1.9% y una densidad urbana de 64.4 hab/ha (SEDATU 2018); consolidándose como la quinta zona más importante de México.

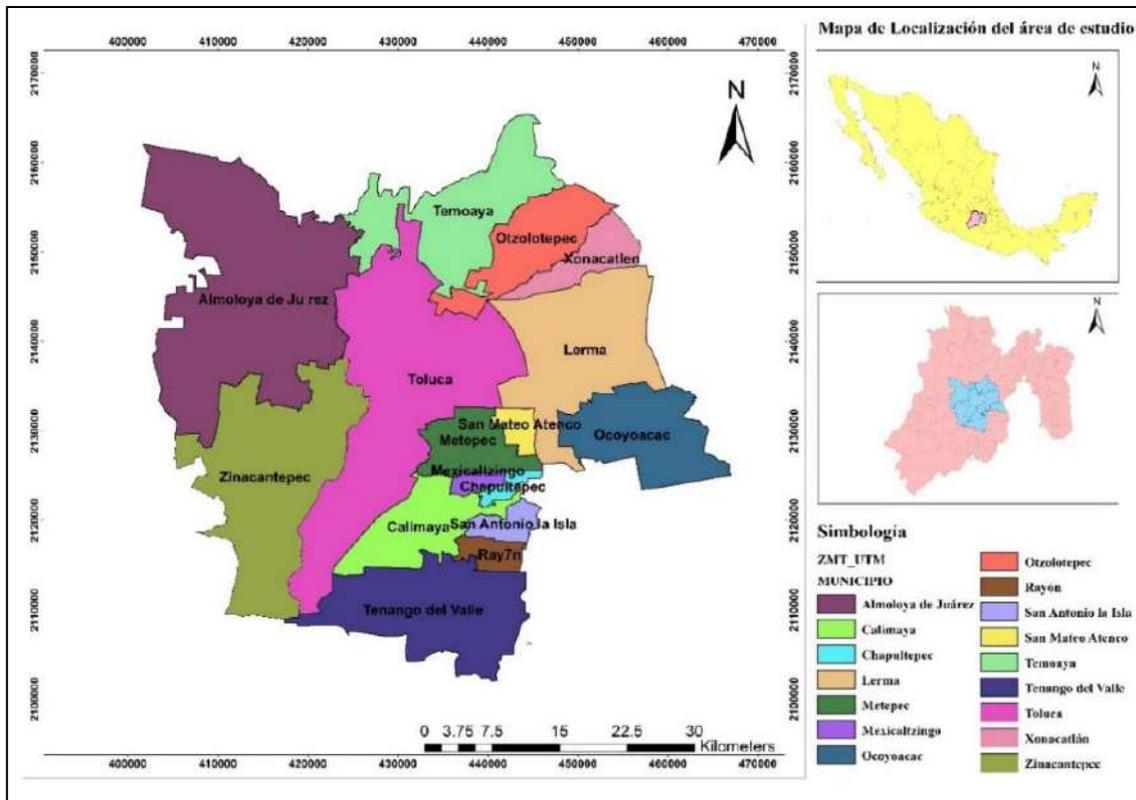
La zona concentra principalmente sus actividades comerciales e industriales en los municipios de Metepec, Lerma, San Mateo Atenco, Ocoyoacac y Toluca principalmente, e



impulsando en los municipios aledaños  
desarrollos inmobiliarios de carácter

habitacional, así como la disposición del suelo  
para su expansión (Garrocho y Campos 2007).

**Figura 1 – Ubicación y conformación de la Zona Metropolitana de Toluca**



Fuente: Elaboración Propia con base a Marco Geoestadístico de INEGI (2019).

Para el siglo XXI la ZMT presenta, al igual que otras ciudades y mega urbes latinoamericanas, un patrón de crecimiento acelerado, planificada con propósitos industriales (Montoya 1995) y por ende es poco ordenada, que se ve reflejado en problemas de movilidad (Centro Mario Molina 2014), deficiencias y deterioro de infraestructuras (Hinojosa 2017) pérdidas de zonas arbóreas y cambio de uso de suelo agrícola (Versañez 2014). Y, además, expresa varios problemas ambientales: cuerpos de agua contaminados (Carreño et al. 2018), altos niveles de contaminación atmosférica (Ballesteros y Rotter 2014), grandes cantidades de generación de residuos sólidos (Rodríguez y Montesillo 2017), ruido (Azpeitia et al. 2016) y entre otros. Realidad metropolitana que constriñe la promesa de desarrollo humano (Ayala 2017), e incumple cualquier posibilidad el objetivo 11 de la ONU (ONU 2018).

Esta contradicción se debe a que las ciudades son una expresión del capitalismo; genera grandes concentraciones de capital que a través de medios de producción y obtiene plusvalor (Pradilla 1984; Harvey 2014, 24); además, a la lógica de la planeación urbana existente desde el siglo XIX obedeciendo a corrientes deterministas y mecanicistas que daban por sentado el mejoramiento de la calidad de vida de una sociedad bajo las leyes de mercado y con una planificación lineal en el tiempo, que, sin embargo, esta postura urbana ya es considerada como un fracaso en todo el mundo (Boccolini 2016), porque las personas, sus interacciones, sus concepciones de la vida, su historia y su cultura, sus políticas, sus patrones de consumo son los que determinan el medio (la ciudad) donde viven.



Por ello, existe la imperiosa necesidad de ver a las ciudades como sistemas complejos en términos su interacción con el entorno, de los intercambios de materiales y energía, de conectividad, sinergias, contextos sociales e históricos, para entender su comportamiento, la participación de todos los actores, movimiento de recursos, (Boccolini 2016) y su no linealidad en el tiempo (Aquilué y Ruíz 2020).

Es entonces que se podrá tener una planeación urbana integral que podrá alcanzar la sustentabilidad; para lo cual el concepto y la herramienta del metabolismo urbano y la entropía son herramientas útiles para ello (Díaz 2014; Martínez 2015, 27).

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Metabolismo urbano

Las ciudades son sistemas termodinámicos abiertos cuya “vitalidad urbana depende directamente de las relaciones ecosistémicas con las áreas aledañas, de la eficiencia y eficacia de los procesos internos de transformación y las redes de abastecimiento local, regional y global” (Díaz 2018).

El estudio de todo ello es indispensable para poder entenderlas y modificarlas y se hace a través de lo que hoy se conoce como metabolismo urbano. El metabolismo urbano se define: “suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos” (Kennedy et al. 2007). Este concepto fue utilizado por primera vez por Wolman (1965) al cuantificar los flujos de energía y materiales per cápita dentro y fuera de una ciudad hipotética. Su artículo “The metabolism of cities” causó atención por las posibilidades para analizar a las ciudades y su

interacción con los ecosistemas (Céspedes y Morales 2018).

A partir de entonces diversos estudios se enfocan en varios flujos metabólicos (agua, alimentos, energía, materiales de construcción). Algunas contribuciones importantes son de Baccini y Bruner (1990), como precursores teórico-metodológicos; los trabajos de Kennedy et al. (2011) y de Delgado et al. (2012) que analizan comparativamente los flujos metabólicos de ciertas urbes de América Latina, con lo que demuestran que las relaciones de las ciudades con sus medios son fundamentales para creación de rutas más eficientes para el uso y gestión de recursos y residuos.

Sin embargo, estas relaciones tienden a ser insostenibles desde el punto de vista ambiental y generadoras de brechas sociales, pues actualmente las urbes son responsables del 76% del consumo global de energía, del 76% de la emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero (IPCC 2014); del 75% del consumo total de materiales y del 50% de la generación de residuos pues son los lugares que concentran el 80% del consumo (PNUNA 2013) y la producción total de energía y de bienes; mientras que la desigualdad social se ha incrementado en un 20% desde 2010 a 2018, disminuyendo el ingreso y el acceso a servicios básicos de salud o educación (PNUD 2018).

Es decir, los análisis metabólicos deben reconocer la realidad compleja urbana. No obstante, los estudios se han quedado cortos al únicamente considerar los análisis de flujos de materiales (AFM) y excluyen la cuestión energética, que regularmente al tratarse de otra dimensión, es imperante e implícita en todas las actividades económicas<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Actualmente existen limitaciones y dificultades en la generación de la información en un lugar concreto, compararlo con otro e incluso, hacer estudios a través del tiempo. Este tipo de limitaciones se

presenta en la academia latinoamericana donde la literatura de este tema es limitada todavía (Céspedes y Morales 2018; Wang *et al.* 2021).



## 2.2 Consideraciones termodinámicas para el estudio de las ciudades

Las ciudades son artefactos de naturaleza compleja porque en éstos se expresan múltiples relaciones entre sus habitantes y el entorno, no son solo infraestructura, ya que, dentro de ellas, se dan diferentes formas de vida urbana. Desde principios de la historia, las poblaciones humanas cambiaron el entorno natural por otro distinto, en una disposición diferente de elementos con respecto al ambiente. Cada ciudad en cada lugar del planeta es definida por ciertos límites ya sea físicos, sociales, económicos y culturales que determinan su

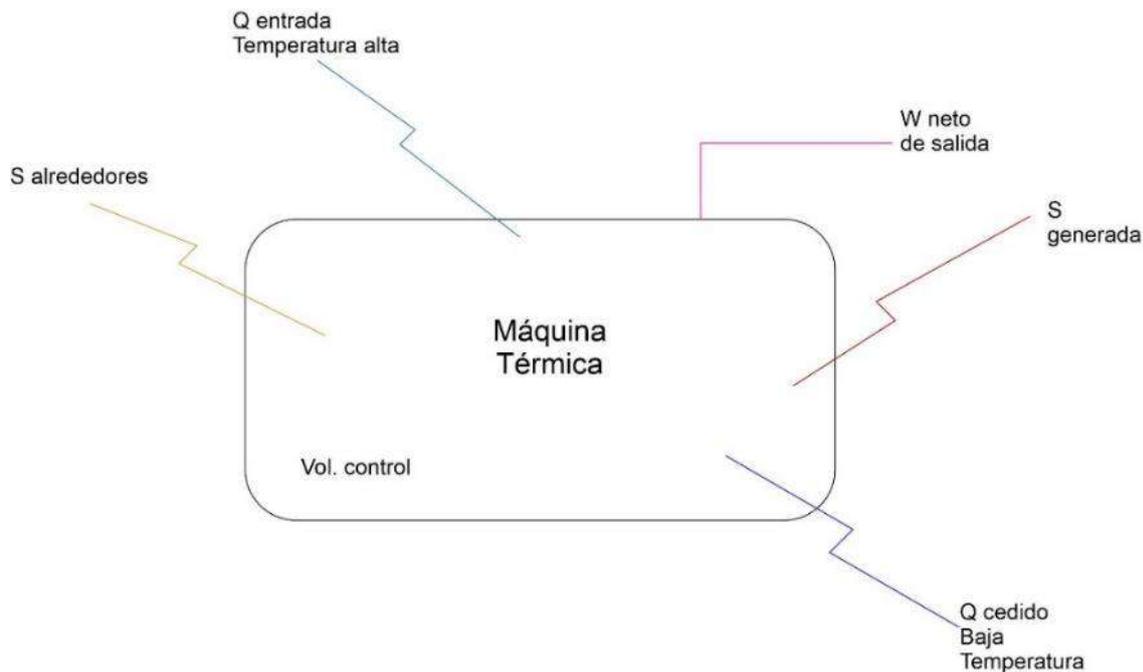
comportamiento, dan lugar a la cultura y forma a una sociedad (Fariña y Ruíz 2002). Es decir, las ciudades son organismos vivos que tiene para mantenerse vivos no siguen procesos lineales, son discontinuos en el tiempo, que requieren un flujo continuo de materiales y energía para mantener sus poblaciones, su estructura económica y la competitividad en un mundo globalizado. Metabolismo urbano que indudablemente genera corrientes de desecho no aprovechables por el mismo sistema y esto provoca problemas en su funcionamiento y en su entorno; comportándose como un sistema termodinámico abierto, máquina térmica (Figura 2).

**Figura 2. Sistema termodinámico abierto**



Fuente: Elaboración propia.

Una máquina térmica es un dispositivo que produce trabajo a partir del calor en un proceso cíclico. Una de sus principales características es la absorción de calor a altas temperaturas, la disipación de calor hacia sus alrededores a temperaturas menores y a la producción de trabajo (Smith et al. 2003, 169) (Figura 3).

**Figura 3. Diagrama de una máquina térmica**

Fuente: Elaboración propia.

Bajo este isomorfismo temático, una ciudad para mantenerse viva continuamente está transformando materia y energía proveniente de los alrededores, teniendo una relación con el medio circundante a través de los flujos, la disipación de energía y el trabajo generado y

entrante del entorno (Fariña y Ruíz 2002), por tanto, obedecen las leyes de la termodinámica, aplicadas de la siguiente manera (Díaz 2018):

**Tabla 1. Definición de las leyes termodinámicas y su interpretación a las ciudades**

Principio termodinámico	Interpretación para la ciudad	Ejemplo
Ley Cero. "Si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí". (Cengel y Boles 2012, 17)	Ley cero. Las ciudades siempre tenderán a estar en equilibrio con sus alrededores.	Si una ciudad tiene ciertas condiciones, las ciudades aledañas buscarán estar en las mismas condiciones.
Primera ley. "Cuando un sistema pasa por un cambio cíclico, el calor neto que entra o sale del sistema es igual al trabajo neto que efectúa o admite el mismo" (Faires 2002, 80)	Primera Ley. "En los procesos urbanos el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado para su mantenimiento y crecimiento" (Díaz 2018).	Todas las actividades que se realizan en una ciudad requieren energía y, por tanto, generan un trabajo y desprenden calor. Esto puede originar, por ejemplo, islas de calor.
Segunda ley. "Ninguna máquina termodinámica real o ideal que opera en ciclos puede convertir en trabajo todo el calor suministrado a la sustancia operante, sino que tiene que ceder una cierta cantidad de este calor" (Faires 2002, 108).	Segunda Ley. Cualquier actividad (trabajo) que realice la ciudad o se realice dentro de ella, siempre emitirá energía o calor no aprovechable al entorno.	La cantidad de energía aprovechada en todas las actividades urbana alcanza eficiencias menores del 40 % (Díaz 2018). Otras manifestaciones de energía no aprovechada en las ciudades son el ruido, los gases de combustión.



Tercera ley. “La entropía absoluta es cero para todas las sustancias cristalinas perfectas a la temperatura de cero absoluto” (Smith et al. 2003, 200).	Tercera Ley. La entropía en las ciudades tiende a disminuir cuando sus temperaturas también lo hagan.	Termodinámicamente, una ciudad es menos entrópica en la estación invernal.
---	---	--

Fuente: Elaboración propia en base con Díaz (2018).

Ahora bien, de acuerdo con la figura 3, del calor total entrante  $Q_e$ , una parte se convierte en trabajo neto y otra parte se convierte en calor de salida  $Q_s$ , o energía no útil que nunca tendrá un valor de cero (Cengel y Boles 2012, 282-283); es decir, las ciudades como máquinas térmicas siempre disiparán energía, teniendo una eficiencia térmica menor al 40% (Díaz 2018), que es la fracción de calor o energía de entrada que se convierte en trabajo neto (Tabla 1).

Aunado a esto, al considerar la calidad de la energía que una ciudad recibe, aprovecha y disipa por todos sus procesos internos, es imperante hablar de entropía. Toda vez, que este axioma de la Segunda Ley de la Termodinámica señala el nivel desorden existente en un sistema, que, para el caso urbano, se manifiesta a través de la contaminación, ruido, generación de residuos, problemas de movilidad, desgaste de infraestructura, entre otros. Más cuando la entropía, como propiedad extensiva de la materia, es proporcional a la cantidad de masa existente en un sistema, lo que significa que a mayor crecimiento urbano (automóviles, población, infraestructura), mayor será la entropía (Marchettini et al. 2006; Cengel y Boles 2012, 334), es decir mayor desorden interno y menos energía útil (Martínez 2015, 28)<sup>2</sup>. Y si se considera la Cuarta Ley de la Termodinámica expuesta por Georgescu – Roegen (Carpintero 2006, 146), se genera mayor cantidad de materia no útil, es decir, mayor cantidad de residuos. Ante este escenario, los habitantes de una ciudad están perdiendo su calidad de vida.

Al hacer una reflexión de lo mencionado, se evidencia que el problema urbano actual debe

ser considerado como urgente. Y es imperante que sea planteado desde una visión de la complejidad más cuando la termodinámica es la principal ciencia de la complejidad (Maldonado y Gómez 2011), por lo tanto, los estudios metabólicos no sólo deben incluir cuestiones matemáticas, sino que se deben tomar aspectos más profundos de la entidad humana, como lo es la historia, la cultura, la cosmovisión, la organización, política, que son parte fundamental del proceso metabólico (González y Toledo 2011, 69), de lo contrario las soluciones planteadas solo serán superficiales, ineficientes e irreales.

Un aspecto para considerar, partir de la transición hacia los combustibles fósiles, se impulsó un crecimiento desmedido de las ciudades sustentadas en su industrialización y en un modelo económico que originó un punto de inflexión sin retorno en el metabolismo social urbano (González y Toledo 2011, 237), que desde el punto de vista termodinámico es un proceso irreversible, pero que puede costar la vida en el planeta.

La organización termodinámica actual de las ciudades está basada en el crecimiento, que evidenciado está supera la capacidad de carga de la biosfera (Krausmann, et al. 2008; Steffen, et al. 2015; Latouche 2009, 38), y que junto con el crecimiento económico son una de las causas a los problemas sociales y ambientales que hoy aquejan al planeta. Que Latouche (2009, 39) define como el origen del mal.

Ante todo, lo anterior, el presente trabajo tiene por objetivo dar cuenta de los flujos energéticos de la ZMT en dos periodos de tiempo, entre 2000

<sup>2</sup> Se trabaja con la termodinámica no atomista, es decir, no contempla los aspectos clásicos de la

termodinámica y la filosofía atomista, sino desde las ciencias de la complejidad.



y 2019, para evidenciar el crecimiento insostenible de dicha zona a través de sus niveles de consumo de energía y que hoy se ven reflejados en graves problemas ambientales y en la calidad de vida de sus habitantes, y hacer énfasis que las actuales políticas públicas no han sido las más viables en términos termodinámicos y de planeación urbana.

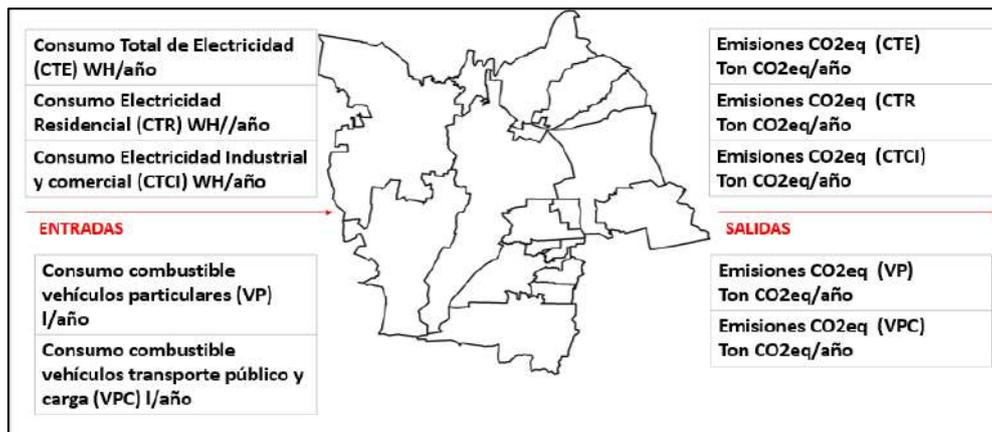
### 3. Metodología

Para el presente estudio, se llevó a cabo un conteo de flujos de materiales y energía (MEFA, por sus siglas en inglés), donde se determinaron indicadores del consumo de energía y residuos generados en los 16 municipios que componen la ZMT durante 2000 y 2019.

En la figura 4 se muestra a la ZMT como un sistema abierto, que recibe electricidad para consumo residencial (CTR), comercial e

industrial (CTCI) y la sumatoria de ambos que corresponde al consumo total eléctrico (CTE); además de combustibles para automóviles particulares (VP) y para vehículos de transporte público y de carga (VPC). Se consideró que: 1) los datos de consumo de electricidad de tomaron directamente de los Anuarios Estadísticos del Estado de México (INEGI, 2001 y 2017); 2) los datos de consumo de combustible se estimaron con respecto a las ecuaciones mostradas en la Tabla 2, tomando en cuenta el parque vehicular que circula en el área de estudio (INEGI, 2001; 2020), además de datos de distancias entre las cabeceras municipales hacia la ciudad capital, Toluca; 3) se realizaron cálculos de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq provenientes de ambas entradas, que son residuos de alta entropía (Rebane 1995). Dichos cálculos se hicieron con base a lo señalado en la Tabla 3.

**Figura 4. Indicadores para los flujos energéticos de la ZMT en el periodo de estudio**



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el principio del balance de masa, es importante destacar que, dentro del proceso de conteo, la suma de todos los recursos de entrada y salidas, así como los subcomponentes o flujos (en el caso pertinente), no necesariamente son iguales al total de entradas y salidas de todo el sistema, debido a cuestiones como: doble conteo, interdependencia de los flujos en aspectos económicos o el desglose de todos los sectores estudiados, externalidades y aspectos sociales que influyen en el metabolismo (Schandl, et al.

2002, en Browne et al. 2012). Además, la pertinencia de los datos en el momento de haber sido recabados presenta algunos desfases en tiempo, siendo los datos más actualizados, el padrón de vehículos (INEGI 2020), por tanto, los resultados presentados corresponden a un ajuste de información en el periodo de estudio, que finalmente, corresponden a la realidad que vive la zona de estudio.

Los resultados son presentados son los correspondientes al CTE, las emisiones totales de CO<sub>2</sub>eq correspondientes a este indicador; las



tasas de éstos por habitante; mientras que, para la cuestión del combustible, se estimaron los consumos por VP, VPC, y su sumatoria; las emisiones correspondientes a indicadores y, tasas por habitante.

**Tabla 2. Cálculos para la estimación de combustible entrante a la ZMT**

Variable	Fórmula	Consideraciones	Fuente
Distancia Recorrida por vehículo por año DRVA (km/año)	$DRVA = DMT * 2 \text{ vueltas} * 7 \text{ días} * 4 \text{ sem} * 12 \text{ meses}$	DMT = Distancia entre la cabecera municipal al centro Toluca (km/ vuelta) Para VP se consideraron 2 vueltas Para VPC se consideraron 10 vueltas	Fórmula propuesta por los autores
*Factor de consumo estimado de combustible anual FCCA (l/año)	$FCCA = \frac{[\% \text{ ciudad}] * DRVA \left(\frac{\text{km}}{\text{año}}\right)}{\text{Rendimiento en cd} \left(\frac{\text{km}}{\text{l}}\right)}$	*% ciudad = Porcentaje de uso del automóvil en ciudad. Para este caso se consideró un 100% *Rendimiento en ciudad = Rendimiento de combustible promedio que tiene un automóvil en la ciudad (10 km/l).	*CONUEE (2015)
*Consumo de combustible VP y VPC (l/año)	$CCVP = FCCA * TVP$ $CCVPC = FCCA * TVPC$	**TVP: total vehículos que circulan en ZMT **TVPC: total de vehículos que circulan en ZMT	*CONUEE (2015). **INEGI (2001; 2019)

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3. Cálculo para la estimación de CO<sub>2</sub> eq para la ZMT**

Variable	Fórmula	Consideraciones	Fuente
**CO <sub>2</sub> equivalente por electricidad (tonCO <sub>2</sub> eq/año)	$** \text{ tonCO}_2\text{eq} = \text{factor} \left(\frac{\text{tonCO}_2\text{eq}}{\text{MWh}}\right) * \text{CTE} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{año}}\right)$	*CTR y CTCI **Factor para 2000: 0.6043 tonCO <sub>2</sub> eq/MWh, ***Factor para 2015: 0.458 ton CO <sub>2</sub> eq/MWh	*INEGI (2000; 2017) **SEMARNA T (2010) **SEMARNA T (2016)
*CO <sub>2</sub> equivalente por consumo de combustible (tonCO <sub>2</sub> eq/año)	$* \text{ tonCO}_2\text{eq} = CCVP \left(\frac{\text{l}}{\text{año}}\right) * \text{factor de emisión} \left(\frac{\text{KgCO}_2\text{eq}}{\text{l}}\right) * \frac{\text{ton}}{1000 \text{ kg}}$	*Factor de emisión: Gasolina premium: 2.229kgCO <sub>2</sub> eq/l Diesel: 2.599 kgCO <sub>2</sub> eq/l *Factores de emisión para convertir unidades: Gasolina premium: 77,473.46 kgCO <sub>2</sub> eq/TJ Diesel: 73,385.6 kgCO <sub>2</sub> eq/TJ Poder calorífico: Gasolina premium: 44.5MJ/kg Diesel: 45MJ/kg	*INECC (2014)

Fuente: Elaboración propia.



Nota al lector: los datos señalador en INEGI, en un año determinado, corresponden al inmediato anterior, por razones de toma de datos. Se hicieron conversiones de MWH/año a J/año.

Finalmente, se calculó el índice de eficiencia metabólica del consumo de combustible total dentro de la ZMT en el periodo de estudio, como parte del sistema termodinámico que es, a través de la ecuación (Browne et al. 2012):

IEM

$$= \frac{\text{Emisiones totales por consumo combustible}}{\text{consumo total combustible}}$$

entre 2000 y 2016, pasando de 8.9 PJ, a 12.46 PJ respectivamente, el equivalente al 38.7% de incremento en el consumo total de electricidad (CTE). Donde el sector residencial casi duplicó su consumo, reportando en el 2000 1.20 PJ y en 2016 2.08 PJ, mientras que el sector industrial pasó de 8.98 PJ a 12.46PJ en el periodo de estudio (Tabla 4, Figura 5).

#### 4. Resultados: metabolismo energético

El aumento en el consumo de energía eléctrica de la ZMT es innegable en periodo comprendido

**Tabla 4. CTE de la ZMT en 2000 y 2017**

	Población (2000)	CTR (PJ/año)	CTCI (PJ/año)	CTE (PJ/año)	CTE/hab (MJ/hab)	Incremento en 2000-2017 (PJ/año)
ZMT						
2000	1,605,571	1.20	7.78	8.985	55.96	
2016	2,705,593	2.08	10.38	12.46	46.06	<b>38.70</b>

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al consumo de combustible se refiere, el incremento total fue de 56.61%, es decir, pasó

de 19.69 PJ/año a 50.85 PJ en 2017, debido al crecimiento del parque vehicular en toda la ZMT, que fue de 362,323 a 1,153, 942 unidades (Tabla 5).

**Tabla 5. Consumo de combustible por tipo de vehículo en la ZMT en 2000 y 2019**

	Tipo de vehículo	año	Población (hab.)	Núm. total de vehículos	consumo combustible (m3/año)	consumo másico (Ton/año)	Consumo energético (PJ/año)	Consumo /hab. (GJ/hab.)	Incremento en 2000-2019 (Ton/hab.)
ZMT	VP	2000	1,605,571	290,191	234,817	171,416	7.63	4.75	
	VPC	2000		72,132	325,219	267,981	12.06	7.51	
	<b>VP+VPC</b>	<b>2000</b>		<b>362,323</b>	<b>560,036</b>	<b>439,396.63</b>	<b>19.69</b>	<b>0.27</b>	
	VP	2019	2,705,593	1,030,893	906,957	662,078	29.46	10.89	
	VPC	2019		123,049	576,814	475,294	21.39	7.91	
	<b>VP+VPC</b>	<b>2019</b>		<b>1,153,942</b>	<b>1,483,770</b>	<b>1,137,372</b>	<b>50.85</b>	<b>0.42</b>	<b>53.61</b>

Fuente: Elaboración Propia.



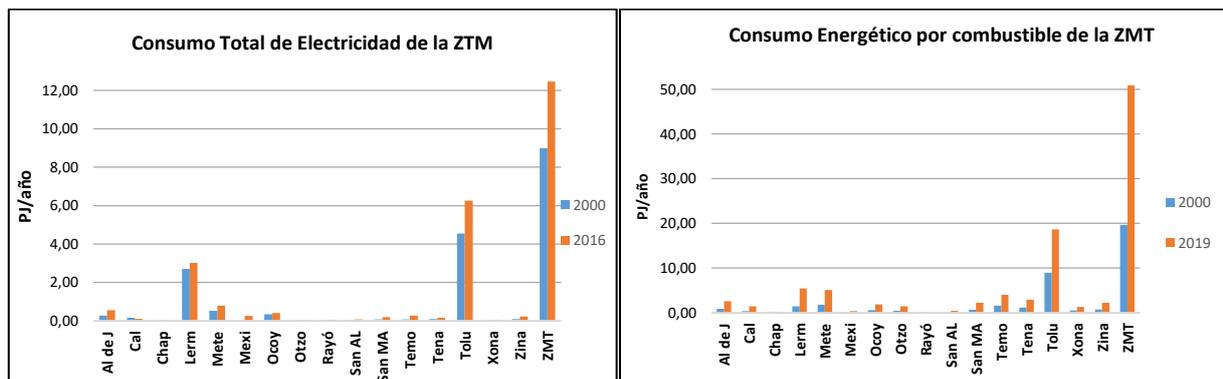
La participación más importante en estos consumos repercute principalmente en Toluca, Metepec y Lerma, toda vez que en ellos se concentra el mayor parque automotor registrado de la ZMT, que indudablemente conlleva a un mayor consumo de combustible. Sin embargo, los otros 13 municipios también aportan al metabolismo energético al ser “dormitorios”, los tiempos y frecuencias de transporte aumentan con el subsecuente incremento de combustible (Figura 6).

Algo singular de esta investigación es la relación inversa entre el consumo agregado de energía eléctrica y el per cápita, ya que el CTE se incrementó, y el per cápita disminuyó de 55.96

MJ/hab. año en el 2000 a 46.06 MJ/hab. año en 2016; esto representa una desigualdad energética entre los en los municipios periféricos (los “dormitorio”) y la centralidad (Toluca, Metepec y Lerma, Tabla 4).

Comportamiento contrario al consumo de combustible, en donde hay una relación directa entre los valores agregados y per cápita, cuyo incremento fue 0.27 GJ/hab. año a 0.42 GJ/hab. año. Es decir, el incremento del parque automotor es democrático, debido a la facilidad de adquirir un vehículo, la deficiencia, peligrosidad, frecuencia y tiempos de recorrido del transporte público (Tabla 5).

**Figuras 5 y 6. Consumo Total de Electricidad y de Combustible de la ZMT**



Fuente. Elaboración propia.

Nota: 1) Los municipios con consumo de electricidad en (PJ/año) más sobresalientes fueron: Almoloya de Juárez (de 0.27 a 0.56), Lerma (2.71 a 3.01), Metepec (0.52 a 0.79), Mexicaltzingo (0.01 a 0.25), Ocoyoacac (0.34 a 0.40), Toluca (4.54 a 6.25). 2) En cuanto al consumo energético de combustible (en PJ/año) destacan: Almoloya de Juárez (0.91 a 6.54), Lerma (1.46 a 5.47), Metepec (1.79 a 5.14), Ocoyoacac (0.60 a 1.87) San Mateo Atenco (0.65 a 2.24), Tenango del Valle (1.18 a 2.94), Toluca (8.94 a 18.7), Zinacantepec (0.77 a 2.23).

En cuanto a las emisiones producidas por el CTE en la ZMT tuvieron un ligero incremento, pasando de 1,508,280,226 TonCO<sub>2</sub>eq/año a 1,585,531,800 TonCO<sub>2</sub>eq/año, lo que es igual al 5.12%. Por su parte, el consumo por habitante pasó de 939.40 a 586.02 TonCO<sub>2</sub>eq/año hab. (Tabla 6, Figura 7). Lo que ratifica la inequidad en cuanto al acceso y consumo de energía eléctrica en la ZMT, más cuando que la población aumentó en 68.5%.

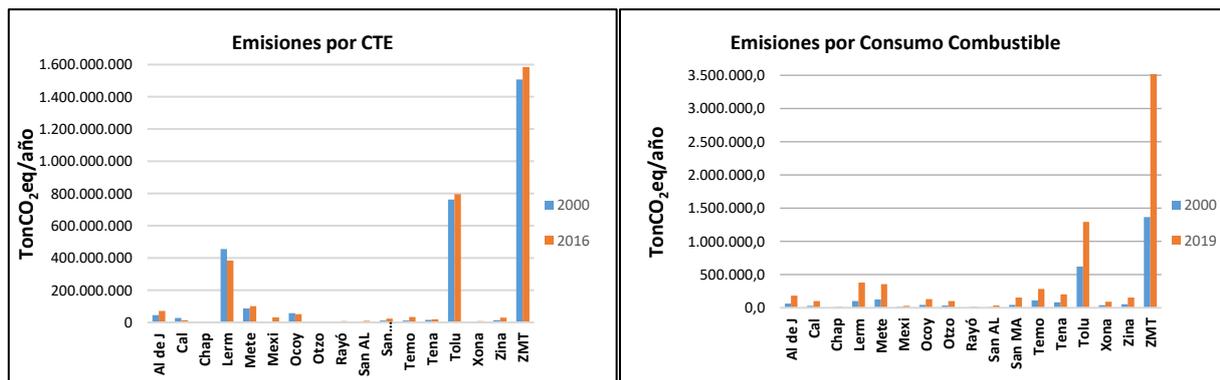
**Tabla 6. Emisiones totales de CO<sub>2</sub>eq por CTE en la ZMT**



	Población	Emisiones CTR (TonCO <sub>2</sub> eq/año)	Emisiones CTCL (TonCO <sub>2</sub> eq/año)	Emisiones CTE (TonCO <sub>2</sub> eq/año)	Emisiones CTE/ hab. (TonCO <sub>2</sub> eq/año hab.)	Incremento en 2000-2016 (TonCO <sub>2</sub> eq/año o hab.)
ZMT						
2000	1,605,571	201,987,275	1,306,292,951	1,508,280,226	939.40	
2016	2,705,593	264,368,134	1,321,163,746	1,585,531,880	586.02	<b>5.12</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Figuras 7 y 8. Emisiones totales de TonCO<sub>2</sub>eq/año por CTE y Combustible en la ZMT**



Fuente: Elaboración propia.

Nota: 1) Los municipios con mayores emisiones por consumo de electricidad fueron: Lerma (484 y 383 mill/año respectivamente), Metepec (86 y 100 mill ton/año) Toluca (762 y 795 mill. ton en cada año). 2) Mientras que en el caso de emisiones por consumo de combustible destacan: Lerma (101 y 138 mill ton/año), Metepec (124 y 354 mill. Ton/año), Ocoyoacac (41 y 129 mill ton/año), Otzolotepec (32 y 102 mill ton/año), San Mateo Atenco (44 y 154 mill ton/año), Temoaya (110 y 281 mill ton/año), Tenango del Valle (82 y 203 mill ton/año), Toluca (620 y 1,293 mill ton/año), Xonacatlán (36 y 91 mill ton/año) y Zinacantepec (53 y 153 mill ton/año).

En el caso de las emisiones por consumo de combustible, el incremento total fue de 52.78% en el periodo de estudio pasando de 1,366,110.41 a 3,517,161.46 TonCO<sub>2</sub>eq/año, a una razón por habitante de 0.85 en el 2000 a 1.30 TonCO<sub>2</sub>eq/año hab. en el 2019 (Tabla 7, Figura 8).

La expansión en horizontal de la ZMT, el aumento del parque vehicular y de la población, el incremento en los tiempos de desplazamiento, el deterioro de la infraestructura vial, los mayores conflictos viales y las distancias

recorridas, aunados a una tecnología (motor de combustión interna) con unas bajas eficiencias de conversión (motor de combustible, menor al 30% (Llanes et al. 2018), y de acuerdo con Ramírez (2018) un motor a diesel por debajo del 48%), hacen que difícilmente la ZMT contribuya al protocolo de Kioto y al cumplimiento de los Objetivos de la ONU (7 y 13). Adicionalmente y visto como sistema termodinámico parte de la entropía que se genera en la ZMT se evidencia en contingencias ambientales frecuentes (INEEC 2020) y en islas de calor (Morales et al. 2007).

**Tabla 7. Emisiones totales de CO<sub>2</sub>eq por consumo de combustible en la ZMT**

	Tipo de vehículo	año	Emisiones anuales (tonCO <sub>2</sub> eq/año)	Emisiones /hab (Ton/hab)	Incremento en 2000-2019 (Ton/hab)	IEM
ZMT	VP	2000	523,848	0.33		



	VPC	2000	842,263	0.52		
	<b>VP+VPC</b>	<b>2000</b>	<b>1,366,110.41</b>	<b>0.85</b>		<b>3.11</b>
	VP	2019	2,023,311	0.75		
	VPC	2019	1,493,850	0.55		
	<b>VP+VPC</b>	<b>2019</b>	<b>3,517,161.46</b>	<b>1.30</b>	<b>52.78</b>	<b>3.09</b>

Fuente: Elaboración propia.

## 5. Análisis del metabolismo urbano de la ZMT

La ZMT es una máquina térmica con flujos energéticos y materiales lineales, cuyo comportamiento actual evidencia problemas ecológicos y sociales, resultado de acciones políticas y gubernamentales que se han tomado desde los años cincuenta, cuando se planeó que Toluca fuera una ciudad industrial (Montoya 1995). La planeación urbana mexicana y, por ende, la local, están sustentadas en métodos mecanicistas que hoy en día, se consideran obsoletas (Gutiérrez 2013), de tal suerte que ya no es posible que bajo esta lógica se dé una propuesta integral y óptima a los problemas que aquejan a la zona de estudio.

Una de estas dificultades es que el área urbana de la ZMT se incrementó horizontalmente a un ritmo de ocho veces superior al crecimiento poblacional entre 1994 y 2014 (Centro Mario Molina 2014), lo que explica en parte, las bajas eficiencias de este sistema termodinámico con respecto al consumo de combustible, pues su valor se redujo de 3.11 en 2000 a 3.09 en 2019 (Tabla 7). Esta forma de expansión ha implementado infraestructura que, por un lado, promueve el uso de vehículo privado (Tabla 5) y que está sustituyendo zonas arbóreas por concreto.

Asimismo, estos valores reafirman que el proceso de la conformación de la ZMT bajo los esquemas de planeación urbanos actuales, al igual que otras megaciudades latinoamericanas se ha caracterizado por una concentración de la población, una expansión urbana de forma desordenada y dispersa (Adame et al. 2020; Delgado et al., 2012), aunado a una configuración social segregada y desigual, observada en el consumo de electricidad (Tabla 4), y en el desplazamiento cada vez mayor de

los habitantes de los municipios “dormitorio” a los municipios centrales (Toluca, Metepec, Lerma); lo que termodinámicamente representa un mayor consumo de recursos para realizar el trabajo interno dentro del sistema, y con ello, una mayor generación de entropía interna (Díaz 2018).

Esta entropía se manifiesta, además, en la contaminación ambiental, que como se señala en las Tablas 6 y 7. De acuerdo con el World Air Quality Report (2018) la Ciudad de Toluca ocupó el noveno lugar en América Latina y el Caribe en partículas PM<sub>2.5</sub> superando a la Ciudad de México con datos anuales superiores a 26.4 mcg/m<sup>3</sup> contra 19.7 mcg/m<sup>3</sup>. Esto significa que los habitantes de la zona de estudio podrían presentar a corto plazo: aumento de la morbilidad respiratoria, disminución de la función pulmonar con obstrucción de los mecanismos de defensas; y a largo plazo, un menor desarrollo de la estructura y funcionamiento del sistema respiratorio en niños, junto con una mayor propensión a cáncer en adultos (Oyarzún 2010).

Por otro lado, desde las políticas de planeación urbana de la ZMT, los gobiernos desde los años sesenta donde México se comprometió a garantizar el bienestar de los habitantes urbanos alcanzando la sustentabilidad a través de la firma de acuerdos Hábitat (I, II y III) y los Objetivos del Desarrollo Sustentable de la ONU (ODS, ONU 2018). Ante esto, no ha existido una coordinación entre los gobiernos municipales y con el estatal, aunado a que cada periodo gubernamental los planes son renovados, y con ello, no hay continuidad en su ejecución; todo esto como consecuencia de la lógica neoliberal donde el Estado ha estado perdiendo capacidad de acción en la toma de decisiones (Gutiérrez



2017) y está sujeta al cambio de las políticas económicas, donde a través de la urbanización se privilegia el crecimiento económico (Harvey 2014, 31).

Por ello, los gobiernos de la ZMT están lejos de cumplir dichos convenios y los ODS; que termodinámicamente son inviables ya que son un oxímoron (Latouche 2009, 104); aunado que el sistema económico no es compatible con las leyes de la naturaleza. Es por ello, que no será posible alcanzar los siguientes puntos:

1. El objetivo 9, cuyo fomento a la infraestructura está orientada al crecimiento económico y es generalmente es de mala calidad.
2. El objetivo 7, pues hay inequidad en el acceso al servicio eléctrico y otras fuentes de energía, lo que se ha venido acentuando en las últimas dos décadas.
3. El objetivo 11, donde no se asegura una vivienda y servicios seguros para todos los habitantes de la zona, así como no se han reducido los impactos ambientales.
4. El objetivo 13 ya que no las medidas pertinentes para evitar contingencias ambientales e islas de calor, que son constantes en temporada de calor y en diciembre.
5. El objetivo 15, donde el crecimiento horizontal que presenta la ZMT está intensificando el cambio de uso de suelo deforestando áreas boscosas y agrícolas para sustituirlas por infraestructura urbana.
6. De acuerdo con la cuarta ley de la termodinámica “es imposible producir una mercancía sin generar a continuación un residuo equivalente en forma de materia y energía degradadas. Como la energía y los materiales no se pueden crear ni destruir, lo que entra en forma de factores productivos tiene que salir forzosamente como mercancías y residuos, pero no puede desaparecer [Georgescu-Roegen]” (Carpintero 2006, 129).

## 6. Perspectivas finales

Ante todo, lo expuesto, la ZMT es una zona que empieza a sufrir de colapsos parciales ambientales (islas de calor, contingencias ambientales) y sociales (congestionamiento vial, violencia) al romper sus límites homeostáticos, y cuya vulnerabilidad se incrementa ante cualquier tipo de evento inesperado que ocurra.

El proceso de crecimiento y expansión de la ZMT ha sido acelerado e irreversible, ante lo cual, es necesario disminuir este ritmo de expansión. Resulta imperante entonces, un cambio de perspectiva en las políticas de planeación y gestión urbana, que deben estar sustentadas en estudios de metabolismo urbano con la finalidad reestructurar el funcionamiento de la máquina térmica ZMT y con ello, administrar y disminuir la generación de entropía. Por ello, la propuesta de este trabajo sostiene que se puede lograr con:

1. Un cambio de paradigma ante el dominante (crecimiento económico ilimitado en un planeta finito), replanteando los valores hegemónicos del actual sistema económico por otros que sean compatibles con los límites homeostáticos de la zona de estudio. Esto debe ser desde la educación básica.
2. El modelo de consumo energético actual debe ser repensado buscando una mayor eficiencia, tanto en aspectos sociales (mejora en el servicio de transporte público y la disminución del vehículo privado), como ambiental (generación de combustibles a partir de los residuos sólidos urbanos).
3. Construcción de infraestructura (edificios, casas habitación, modificaciones viales) que se orienten al aprovechamiento máximo de la luz solar.
4. Replanteamiento de la estructura de la ZMT, pues las actividades económicas y sociales requieren de desplazamiento, y con ello, consumo de energía, lo que hace que el crecimiento horizontal actual incremente la ineficiencia del funcionamiento termodinámico de la zona. Se debe buscar alternativas que



disminuyan los desplazamientos que los habitantes hacen de los municipios dormitorio a los centrales.

5. Creación de planes eficientes que mitiguen la creación de islas de calor y de contingencias ambientales. Es necesario que se detenga la sustitución de áreas verdes por infraestructura.

6. La planeación la ZMT junto con la municipal debe ser a largo plazo, y no bajo los esquemas actuales mecanicistas y obsoletos.

7. La planeación metabólica debe ser circular, orientada a la reducción, reutilización y reciclaje de los recursos. En este sentido, se deben implementar políticas y reglamentos que conlleven al uso más eficiente posible de todos los combustibles sosteniendo que son recursos limitados y que su uso conlleva a una alta generación de calor disipado.

La transición hacia una perspectiva urbana acorde con los límites de la naturaleza no es fácil, pero ante lo expuesto en este trabajo, resulta indispensable.

## Referencias

Adame, S., Sánchez, R. y Hoyos, G. 2020. Factores socioterritoriales de cambio de uso de suelo en el centro de México. Caso oriente de la Zona Metropolitana de Toluca, México. *Revista Universitaria de Geografía*. 29, 1: 156-183.

Aquilué, I. y Ruíz, J. 2021. Ciudad, complejidad y cambio: fundamentos para el análisis de la incertidumbre en sistemas urbanos. *Revista INVI*. 36, 101: 7-34.

Aranda, J. 2000. Conformación de la Zona Metropolitana de Toluca, 1960-1990. Universidad Autónoma del Estado de México. 1ra Edición.

Aranda, José. 2005. Terciarización y Precarización del trabajo en la Zona Metropolitana de Toluca, 1980-2000. *Papeles de Población*. 11, 46: 109-137.

Ayala, E. 2017. La ciudad como espacio habitado y fuente de socialización. *Ánfora*, 24, 2: 189-216.

Azpeitia, C., Adame, S. y Sánchez, R. 2016. Ruido ambiental y su relación con vehículos de Transporte urbano en el centro histórico de Toluca, Estado de México. [21° encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México, 15- 18 noviembre, AMECIDER, TIM].

Baccini, P. y Brunner, P. 1990. *Metabolism of the Anthroposphere*. 1° Ed. Londres MIT Press. Cambridge.

Ballesteros, M. y Rotter, C. 2014. Análisis de la contaminación del aire en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec a través de la metodología de simulación bajo el método de Montecarlo 2000-2020. [Tesis de Licenciatura, Facultad de Economía, UAEMEX].

Boccolini, S. 2016. El evento urbano. La ciudad como un sistema complejo lejos del equilibrio. *Revista del área de estudios urbanos del Instituto de Investigaciones Gino Germani de la Facultad de Ciencias Sociales (UBA)*. 6: 220-252.

Browne, D., O'Regan, B. y Moles, R. 2012. Comparison of Energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tools for measuring urban sustainability: A Case-study of an Irish city-region. *Ecological Economics* 83: 97-107. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.006

Carpintero, O. 2006. *La Bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Ediciones de Intervención cultural. España.

Carreño, C., Zarazúa, G., Fall, C., Ávila, P., Tejeda, S. 2018. Evaluación de la toxicidad de los sedimentos del curso alto del Río Lerma, México. *Rev. In. Contaminación Ambiental*. 34, 1: 117-126.

Cengel, Y., Boles, M. 2012. *Termodinámica*. McGraw Hill. 7° Edición. México.



- Céspedes, J. D. y Morales-Pinzón, T. 2018. Urban metabolism and sustainability: Precedents, genesis, and research perspectives. In *Resources, Conservation and Recycling*. 131, 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.023>
- Centro Mario Molina. 2014. Estudio del Sistema Integral de Movilidad Sustentable para el Valle de Toluca.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). 2015. *Automovilista eficiente. Guía para el uso eficiente de la energía en el transporte*. Secretaria de Energía. México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/87979/guiaaumovilef.pdf>
- Delgado, G, Campos, C. y Rentería, P. 2012. Cambio Climático y el Metabolismo Urbano de las Megaurbes Latinoamericanas. *Hábitat Sustentable*. 2, 1: 2-25.
- Díaz, C. 2014. Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina*. 2, 2: 51-70. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2014.2.46524>
- Díaz, C. 2018. Complejidad, Gestión y Disipación en la ciudad. Una aproximación desde la entropía. *Questionar Investigación Científica*, 6, 1: 25-36. DOI: <https://doi.org/10.29097/23461098.246>
- Faires, V. y Simmang, C. 2002. *Termodinámica*. Editorial Limusa. 8° Reimpresión. México.
- Fariña, J. y Ruíz, J. 2002. Orden, desorden y entropía en la construcción de la ciudad. *Urban. Revista del Departamento de Urbanística y Ordenamiento Territorial*. 2: 8-15.
- Garrocho, C. y Campos, J. 2007. Dinámica de la estructura policéntrica del empleo terciario en el área metropolitana de Toluca, 1994 – 2004. *Papeles de Población*. 13, 52: 109-152.
- González, M. y Toledo, V. 2011. *Metabolismos, naturaleza e historia. Hacia una teoría de las transformaciones socioecológicas*. Icaria. España.
- Gutiérrez, J. 2013. *La Planeación Urbana en México: retos y perspectivas desde la agenda internacional*. *Revista de Urbanismo*. (29). ISSN0717-5051
- Gutiérrez, J. 2017. México y la Nueva Agenda Urbana. Hoja de ruta con trazos invisibles, [in]capacidades institucionales en el Estado de México. *Bitácora Urbano Territorial*. Vol. 27. (2): 35-43.
- Harvey, D. 2014. *Ciudades Rebeldes. Del derecho de la ciudad a la revolución urbana*. Editoriales Akal. 2° Reimpresión, España. P 21-22
- Hinojosa, R. 2017. Infraestructura urbana, factor influyente de la movilidad urbana y por consecuencia impacta en la seguridad vial, y en la salud pública de la ciudad: caso de estudio, zona metropolitana de la ciudad de Toluca. *Proyección* 21. 11: 124-144.
- Iglesias, D. 2019. De la concentración a la descentralización de los parques industriales en el Estado de México, ¿alternativa de desarrollo regional? *Revista Científica EcoCiencia*. Vol 6, 5: 1-25. DOI: <https://doi.org/10.21855/ecociencia.65.280>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2014. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México,
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2020. Evaluación de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante la contingencia por COVID-19.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2001. *Anuario Estadístico del Estado de México*. Gobierno del Estado de México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825157357>



Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2011. Anuario Estadístico del Estado de México. Gobierno del Estado de México.

<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825002445>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2017. Anuario Estadístico del Estado de México. Gobierno del Estado de México.

<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825094706>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) 2019. Marco Geoestadístico de México.

<https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2020. Registro de Vehículos con motor en circulación. Base de datos.

[https://www.inegi.org.mx/programas/vehiculosmotor/#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/vehiculosmotor/#Datos_abiertos)

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Mitigation of Climate Change. Report (AR5).

Krausmann, F., Erb, K., Gingrich, S., Lauk, C. y Haberl, H. 2008. Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints. *Ecological Economics*. 65, 3: 471-487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.012>

Kennedy, C., Cuddity, J. y Engel-Yan, J. 2007. The changing metabolism of cities. En *Journal of Industrial Ecology*, 11: 43-59. DOI: <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107>

Kennedy, C.; Pincelt, S. y Bunje, P. 2011. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 159, 8-9: 1965-1973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>

Kober, T.; Schiffer, H.-W.; Densing, M. y Panos, E. 2020. Global energy perspectives to 2060 -

WEC's World Energy Scenarios. 2019. *Energy Strategy Reviews* 31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100523>

Latouche, S. 2009. La apuesta por el decrecimiento. Icaria. 2º Edición. España

Liévanos, J. y Villar, A. 2015. Transformación histórica de la Centralidad de Toluca: De la ciudad monocéntrica al espacio metropolitano policéntrico. Pasado, Presente y futuro de las regiones en México y su Estudio. Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C., México. UNAM

Llanes, E., Carguachi, J. y Rocha, J. 2018. Evaluación energética en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6L. Enfoque UTE. 9, 4: 22-232. DOI:10.29019/enfoqueute.v9n4.365

Maldonado, C. y Gómez, N. 2011. El mundo de las ciencias de la complejidad. Ed. Universidad del Rosario. Colombia.

Marchettini, N., Pulselli, F., Tiezzi, E. 2006. Entropy and the city. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 93: 263- 272. Doi:10.2495/SC060251

Martínez, L. 2015. Introducción a los ecosistemas urbanos. Universidad Latinoamericana. 1º Edición. México.

Montoya, J. 1995. Políticas de planeación urbana en la delimitación de lo metropolitano. El caso de la Zona Metropolitana de Toluca. *Papeles de Población*. 8: 37-54.

Morales, C., Madrigal, D. y González, L. 2007. Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*. 14, 3: 307- 316.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2018. La agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe.

Oyarzún, G. 2010. Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena Enfermedades Respiratorias*. (26): 16-25.



Pradilla, E. 1992. Las teorías urbanas en la crisis actual. *Sociológica*. 7, 18: 45-72.

Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA). 2013. City-level decoupling: Urban resource flows and the governance of infraestructura transitions. Summary for Policy Makers.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2018. Índices e indicadores de desarrollo humano. Actualización estadística de 2018.

Ramírez, D. 2018. Análisis de eficiencia térmica del Ciclo Diesel. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte.

Rebane, K. 1995. Energy, entropy, environment: why is protection of environment objectively difficult? *Ecological Economics*, 13: 89-92. En Browne, D., O'Regan, B. y Moles, R. (2012). Comparison of Energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tools for measuring urban sustainability: A Case-study of an Irish city-region. *Ecological Economics* 83: 97-107. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.006

Rendón, L. y Godínez, J. 2016. Evolución y cambio industrial en las Zonas Metropolitanas del Valle de México y de Toluca, 1993-2008. *Análisis Económico*, 31, 77: 115-146.

Rodríguez, E. y Montesillo, J. 2017. Propuesta para la gestión sustentable de los residuos sólidos urbanos en la zona central conurbada de Toluca. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño* 12, 21.

Schandl, H., Grünbühel, C., Harbel, H., Weisz, H. (2002). Handbook of physical accounting: measuring biophysical dimensions of socio-economic activities. IFF Social Ecology Working Paper No. 73. En Browne, D., O'Regan, B. y Moles, R. 2012. Comparison of Energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tools for measuring urban sustainability: A Case-study of

an Irish city-region. *Ecological Economics* 83: 97-107. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.006

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). 2018. Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2015. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/305634/Delimitacion\\_Zonas\\_Metropolitanas\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/305634/Delimitacion_Zonas_Metropolitanas_2015.pdf)

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2004. Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México. [http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas\\_metropolitanas2000/completo.pdf](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas_metropolitanas2000/completo.pdf)

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2010. Factor de Emisión Eléctrico 2013. Programa GEI México. <https://www.geimexico.org/factor.html>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2016. Factor de Emisión Eléctrico 2015. [https://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/cicc/aviso\\_factor\\_de\\_emision\\_electrico\\_2015.pdf](https://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/cicc/aviso_factor_de_emision_electrico_2015.pdf)

Smith, J., Van Ness, H., Abbott, M. 2003. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. McGraw Hill. 6ª Edición. México.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., Vries, W., De Witt, C., Folke, C., Gerter, D., Heinke, J., Mace, G., Persson, L., Ramanathan, V., Reyers, B. y Sörlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*. 347, 6223. DOI: 10.1126/science.1259855

Versañez, C. 2014. Estudio del estado y evolución de la cubierta vegetal en áreas naturales protegidas y áreas verdes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca del 2000 al 2008. [Tesis licenciatura, Facultad de Planeación urbana y Regional, UAEMEX]

Wang, X., Zhang Y., Zhang, J., Chenling F., Zhang, X. 2021. Progress in urban metabolism research and hotspot analysis based on



CiteSpace analysis. *Journal of Cleaner Production*. 281.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125224>

Wolman, A. 1965. The metabolism of Cities. *Scientific American*, 213: 179-190.  
<http://irows.ucr.edu/cd/courses/10/wolman.pdf>

World Air Quality Report (WAQR). 2018. Region and City PM2.5 Ranking. IQAir Air Visual.  
<https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2018-en.pdf>.