

# COMPLEJIDAD, GESTIÓN Y DISIPACIÓN EN LA CIUDAD. APROXIMACIÓN DESDE LA ENTROPÍA

COMPLEXITY, MANAGEMENT AND DISSIPATION IN THE CITY.  
APPROACH FROM ENTROPY CONCEPT

Cristian Julián Díaz Álvarez\*

Recibido: 26 de octubre de 2018

Aceptado: 3 de diciembre de 2018

## Resumen

La vitalidad de las ciudades depende, entre otras muchas cosas, de sus relaciones ecosistémicas con las áreas aledañas, la eficiencia y eficacia de los procesos internos de transformación y las redes de abastecimiento local, regional y global. Por tal motivo, la identificación y entendimiento de las demandas urbanas de materiales y energía, la presión de sus descargas y el nivel de entropía generado son necesidades apremiantes para actuar oportunamente sobre las funciones de relación que pueden socavar el desarrollo y deteriorar el ambiente propio o circundante, en momentos en que la variabilidad climática y el calentamiento global disminuyen las probabilidades de supervivencia de los sistemas humanos. Por tal motivo, es imperativo no solo mejorar la homeóstasis y adaptabilidad de los centros urbanos de economías emergentes y definir nuevos modelos de desarrollo urbano, sino, además, gestionar la entropía y promover flujos cíclicos de materiales y energía con baja afectación a los sistemas de abasto, provisión y alrededores. Iniciativa que propone un metabolismo urbano circular, la relocalización del desorden generado, su potencial conversión en información útil y el acatamiento de las leyes y principios naturales por parte de los tomadores de decisiones, como de la ciudadanía en general.

**Palabras clave:** ciudad, ambiente, entropía, termodinámica, caos.

## Abstract

The survival of cities depends, among many other things, on their ecosystem relationship with the surrounding areas, on the efficiency and effectiveness of internal transformation processes, and the local, regional and global supply networks. For this reason, the identification and understanding of material and energy urban demands, the pressure of their discharges, and the level of entropy generated, are needs to act in a timely manner on the relationship functions that can undermine development and deteriorate the own or surrounding environment; at a time when climate variability and global warming reduce the chances of human systems survival. For this reason, it is imperative not only to improve the urban homeostasis and adaptability in emerging economies and to define new models of urban development, but also to manage entropy and promote cyclical flows of materials and energy with low impact on supply and provision systems, and surroundings

---

\* Ingeniero químico, especialista en Manejo Integrado del Medio Ambiente, magíster en Medio Ambiente y Desarrollo, doctor en Pensamiento Complejo. Líder de Investigaciones, CPCC Proyecto Axioma, Doctorado en Pensamiento Complejo, MMR Edgar Morin, Ciudad de México, México. ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-4212-4947>. [cjdiaz@unal.edu.co](mailto:cjdiaz@unal.edu.co); [investigacion@proyectoaxioma.org](mailto:investigacion@proyectoaxioma.org)

areas. This initiative proposes a circular urban metabolism, the relocation of generated disorder, its potential conversion into useful information, and obedience of the natural laws and principles by decision makers, as well as citizenship in general.

**Keywords:** city, environment, entropy, thermodynamics, chaos.

## INTRODUCCIÓN

Los centros urbanos sufren continuos cambios demográficos, económicos, culturales, políticos, ambientales y de infraestructura durante sus fases de crecimiento y mantenimiento. Esto cambios se expresan, algunas veces, en el incremento de su *stock* material, la consolidación financiera, el enriquecimiento cultural, la cualificación de la población y el afianzamiento de las creencias y visiones de mundo. No obstante, en otras ocasiones, implican la degradación parcial de áreas urbanas, periurbanas, conurbanas y rurales; la destrucción del ambiente natural y construido, y la desaparición de todo vestigio de la civilización, tal como ocurrió en las otrora ciudades Estado maya (Centroamérica), Rapa Nui (Pacífico), Angkor (sudeste de Asia) y en los asentamientos vikingos en Groenlandia y Anasazi (Norteamérica) (Diamond, 2006). Todo ha sido un proceso dinámico y fortuito de existencia, soportado en el intercambio y transformación de materia, energía, información y dinero entre sistemas complejos inmersos en relaciones de poder, jerarquía y autoridad y dependientes de las leyes y principios naturales.

Ejemplos actuales de estos grandes sistemas son las capitales y ciudades emergentes<sup>1</sup> latinoamericanas. Sin embargo, ante la continua presión de una población en aumento sobre su infraestructura, oferta de bienes y servicios, capacidad de carga y resiliencia de sus habitantes, estos sistemas corren el riesgo de exceder los límites permisibles de su propia homeóstasis y adaptabilidad, así como pueden afectar las zonas de frontera y los alrededores y los reservorios de abasto y provisión. Situación que exacerba su vulnerabilidad en momentos en que la variabilidad climática, el calentamiento global, las crisis financieras y económicas, el descontento de la población, la violencia y los escenarios de conflicto disminuyen las probabilidades de supervivencia de los sistemas humanos.

Por tal motivo, la vitalidad de la ciudad dependerá cada vez más de sus relaciones ecosistémicas con las áreas aledañas, la eficiencia y eficacia de los procesos internos de transformación y las redes de abastecimiento local, regional y global. Razón por la cual la caracterización y el entendimiento del comportamiento de sus demandas materiales y energéticas, de la presión de sus descargas, así como la cuantificación del nivel de entropía generado, son importantes acciones para ayudar a identificar operaciones críticas que pueden estar frenando el crecimiento económico, socavando el desarrollo, deteriorando el ambiente propio y circundante y reduciendo la oferta ambiental de los ecosistemas de soporte. Procesos no deseados que con certeza merman la competitividad de las capitales latinoamericanas en los escenarios domésticos, regionales y globales (Díaz, 2014).

En este orden de ideas, se presenta a continuación una reflexión sobre el reto urbano latinoamericano de mejorar el desempeño ambiental de las ciudades desde una perspectiva heterodoxa: la termodinámica no atomista; haciendo énfasis en la propiedad extensiva de la entropía como indicador real de sostenibilidad y generador de caos. Disertación que se soporta en isomorfismos entre la ciudad –como sistema complejo– y los principios de la termodinámica clásica para comprender la inexorable tendencia hacia el desorden urbano y la impajaritable generación de corrientes contaminantes.

<sup>1</sup> El Banco Interamericano de Desarrollo (2015) define ciudades emergentes como aquellas que tienen “un crecimiento poblacional y económico positivo por encima del promedio nacional durante el último periodo intercensal y que tienen una población de entre cien mil y dos millones de habitantes”.

## LAS CIUDADES CAPITALES LATINOAMERICANAS: EN EL FILO DE LA OPORTUNIDAD Y EL ESPEJISMO DEL CRECIMIENTO

La inexorable convergencia de la actividad humana en los centros urbanos determina una función de cambio en las dinámicas sociales, políticas, económicas, culturales y ambientales en su interior y en los sistemas aledaños y de soporte (United Nations Human Settlements Programme, 2011). Esta tendencia, que se agudizará para el año 2030 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2008), es vista por algunos como un problema que exacerbará la pobreza, el crecimiento de los cinturones de miseria y el surgimiento y consolidación de diversos problemas ambientales (Díaz, 2012a; Díaz y León, 2012; Sánchez-Rodríguez, 2008); mientras que otros la consideran como una transformación positiva que coadyuvará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y al crecimiento económico (Martine, McGranahan, Montgomery y Fernández-Castilla, 2008; Sustainable Development Solutions Network, 2017; Tacoli, McGranahan y Satterthwaite et ál., 2008), convirtiéndose así en un espejismo para sus habitantes.

Propiamente, las áreas urbanas en los países en desarrollo y economías emergentes –y su respectiva población– muestran tasas de crecimiento superiores a sus congéneres establecidas en las principales economías (Martine et ál., 2008). Esta tendencia, aunada a las dificultades locales y regionales de infraestructura y acceso a educación de calidad, entre otros servicios, establece brechas sociales, exclusión, inequidad y disparidad de oportunidades; asimismo, conllevan un deterioro ambiental tanto al interior del sistema urbano como en los asentamientos del conurbano y en las zonas adyacentes de soporte (Curtit, 2003; Díaz, 2011; Sánchez-Rodríguez, 2008).

Ante el imaginario del crecimiento económico como vía para el progreso continuo en el mundo rico y como salida de la pobreza para los países en desarrollo o economías emergentes, la población y el capital se han convertido en fuerzas impulsoras que empujan exponencialmente la producción y consumo de alimentos, la utilización de recursos naturales no renovables, los requerimientos energéticos e, indudablemente, la contaminación, entre otros aspectos (Meadows, Meadows y Randers, 1994; Randers, 2012; Yusuf, 2009). Fuerzas de difícil control, rápida acción y cambio que fácilmente podrían superar los límites ambientales del sistema urbano y los alrededores, generando como riesgo probable la declinación o descenso súbito incontrolable e impremeditado de la producción, la capacidad industrial, la población humana y/o la complejidad política, económica y social. Conflictos que han sido evidenciados en varias épocas por reconocidos académicos y pensadores, a saber:

La dificultad de la subsistencia en la naturaleza ejerce sobre la fuerza de crecimiento de la población una fuerte y constante presión restrictiva [...] que se manifestará cruelmente entre los hombres como miseria y vicio. (Malthus, 1798, p. 54)

La utilización humana de muchos recursos esenciales y la generación de muchos tipos de contaminantes han sobrepasado ya las tasas físicamente sostenibles y que sin reducciones significativas en los flujos de materia y energía habría una incontrolada disminución per cápita de la producción de alimentos, el uso energético y la producción industrial. (Meadows, Meadows y Randers, 1994, p. 23)

A veces, las especulaciones malthusianas más siniestras se hacen realidad. (Diamond, 2006)

Infortunadamente, estas advertencias no son tenidas en cuenta en los planes de las ciudades capitales para alcanzar economías sanas que aseguren el bienestar de la población, ya que los esfuerzos se concentran principalmente en asegurar un crecimiento económico positivo. Decisión que se sustenta en la mal llamada curva ambiental de Kuznetz con relación a las curvas de población, crecimiento e ingreso per cápita, que justifica políticas públicas que aceptan la degradación ambiental en las primeras etapas del crecimiento, que consideran la generación de riqueza como

el único modo de obtener un medio ambiente aceptable y constriñen cualquier posibilidad de que las naciones pobres puedan lograr el desarrollo de una manera ambientalmente responsable (Beckerman, 1992, citado por Gómez, 2002; Thatcher, 1989).

Esta crematística urbana se sustenta aún más en las señales de organismos multilaterales como las Naciones Unidas, que ha considerado al crecimiento económico como una necesidad apremiante para alcanzar los otrora Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y los actuales Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), siendo esto explícito en el objetivo 8 (véase United Nations Development Program, 2009; United Nations, 2018). De esta manera, el mejoramiento del tamaño, la eficacia y calidad de la fuerza de trabajo, el pleno empleo, la estabilidad de los precios, la distribución conveniente de los recursos económicos, la distribución satisfactoria del ingreso, la acumulación de capital, la salvaguarda de los recursos naturales, el avance en la ciencia, la tecnología y la innovación y el aseguramiento de un clima político y económico claro (Guthrie, 1963) se consideran totalmente miscibles en el sistema urbano, cuando evidentemente algunos no lo son por naturaleza.

Por tal motivo, en muchas ciudades latinoamericanas este “crecimiento económico” se transforma un “crecimiento no económico” (Daly 2001, p.157), ya que la población sigue creciendo exponencialmente, la redistribución es inexistente, la lucha contra el desempleo se mantiene en franca retirada, la contaminación aumenta y pone en riesgo la salud humana y los sistemas naturales de soporte se degradan día a día.

Por desgracia, todo el concepto de bienestar en función del crecimiento está construido sobre una ilusión, debido a que “las necesidades individuales no se sacian cuando el ingreso se incrementa, y los individuos no se muestran más dispuestos a transferir parte de sus recursos a los pobres cuando se tornan más ricos” (Thurow, 1982, p. 22). Inercia cultural que convirtió la desigualdad como una lamentable necesidad en el camino al mayor crecimiento. Situación evidente en muchas ciudades latinoamericanas.

Ante esta desconcertante situación, la ciudad puede adoptar nuevos esquemas para evitar escenarios de insostenibilidad, a saber: a) alcanzar una curva de distribución viable entre la tríada crecimiento, ambiente y desarrollo, b) considerar un crecimiento cero, c) optar por el espejismo del desarrollo sostenible, d) contemplar un decrecimiento económico o e) gestionar la entropía y establecer metabolismos cíclicos.

En relación a la pseudoestabilidad anhelada entre la ciudad y los sistemas naturales de abasto, provisión y amortiguamiento, la expresión de la vida urbana se traduce en una gran variedad de problemas en los distintos compartimentos ambientales (agua, aire, suelo y biota), así como en el incremento de la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados asociados con fenómenos naturales y antrópicos (Díaz, 2011). Esta realidad obedece a la alteración progresiva de las condiciones de estado ideales por causa de la “rápida producción del territorio urbanizado” (Curtit, 2003, p. 17), que define nuevos límites, áreas de estudio y cambios en los flujos de materia, energía e información, modificando así la forma como el sistema se comporta consigo mismo y con el conurbano, las áreas rurales y los ecosistemas estratégicos.

Esta forma de relación interna y con el entorno ignora la infalibilidad de los principios y leyes naturales, comportamiento insostenible que conllevará, en primera instancia, la afectación de la salud de un buen número de personas, conduciendo un colapso ambiental que a su vez generará cambios en los órdenes social, político y económico, alteración del estado termodinámico de la ciudad (que se verificará en una variación) y aumento en el nivel de entropía generado al interior del sistema.

## EL DESORDEN URBANO DESDE LA TERMODINÁMICA CLÁSICA

Todo habitante y visitante ocasional o recurrente de una urbe, metrópoli o área metropolitana siente y sufre, en alguna medida, la generación y acumulación de entropía en el sistema, la cual se expresa, desde el punto de vista ambiental, como pérdida de la calidad del aire, la contaminación de los cuerpos de agua, la degradación y desertización de suelos, la liberación, bioacumulación y biomagnificación de compuestos orgánicos persistentes y metales pesados, la pérdida de biodiversidad y el incremento en del volumen de basuras, por citar los más importantes. Condición de estado que también se refleja en el deterioro de la infraestructura urbana, la congestión, el sobrepaso de los servicios de movilidad, la degradación e ineficacia de los servicios de salud y educación, el aumento de la inseguridad, entre otros.

Esta realidad urbana puede ser analizada desde la principal ciencia de la complejidad: la termodinámica, la cual se fundamenta en cuatro principios que se enuncian a continuación en términos del estudio de las ciudades (Abbott y Van Ness, 1975; Cengel y Boles, 1994; Cengel y Boles, 2012; Keena y Shapiro, 1947; Russell y Adebisi, 1993; Smith, Van Ness y Abbot, 1996):

- a) *Ley cero*. Si dos sistemas [urbanos] están en equilibrio con un tercero, entonces deben estar en equilibrio entre ellos.
- b) *Primera ley*. El cambio de energía total durante un proceso adiabático [urbano] debe ser igual al trabajo neto realizado<sup>2</sup> (ecuación 1). Esta ley es conocida también como el principio de conservación de la energía, cuyo axioma dice que la energía total de cualquier sistema y su medio que lo rodea (considerados juntos) se conserva;

$$\Delta E = Q - W \quad (1)$$

Donde:

$\Delta E$ : cambio de energía total del sistema

$Q$ : calor suministrado al sistema

$W$ : trabajo realizado por el sistema

- c) *Segunda ley-enunciado de Clausius* (bombas de calor). Es imposible construir una [ciudad] dispositivo que opere [de una manera específica] en un ciclo y no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un [lugar] cuerpo a baja temperatura a otro de alta temperatura.  
*Enunciado de Kelvin-Planck* (máquinas térmicas). Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo [urbano] reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo (ecuación 2).

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (2)$$

Donde:

$\delta Q$ : cantidad diferencial de transferencia de calor hacia el sistema (positivo +) o desde el sistema (negativo -)

$T$ : temperatura en la condición de frontera

Adicionalmente, el enunciado Kelvin-Planck de eficiencia enuncia que ninguna máquina térmica [ciudad] puede tener una eficiencia térmica del 100 %. Asimismo, de la segunda ley se desprende

<sup>2</sup> Este principio también puede ser enunciado así: En un proceso cíclico [urbano], el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado.

el concepto primario de *entropía* ( $S$ ), que es una propiedad intrínseca del sistema que está relacionada funcionalmente con los depósitos de calor existentes, la temperatura y la cantidad de materia (ecuación 3).

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \tag{3}$$

Donde:

$\delta Q$ : cantidad diferencial de transferencia de calor hacia el sistema (positivo, +) o desde el sistema (negativo, -)

T: temperatura en la condición de frontera

- d) *Tercera ley*. La entropía de una [ciudad] sustancia pura en equilibrio termodinámico tiende a cero cuando la temperatura de la [ciudad] sustancia pura se acerca al cero absoluto, la cual puede ser enunciada también como: la entropía de una sustancia pura cristalina [ciudad] a una temperatura absoluta de cero es cero.

Estos cuatro principios, aplicados al estudio de las ciudades, se describen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Definición y aplicación de los principios termodinámicos en las ciudades

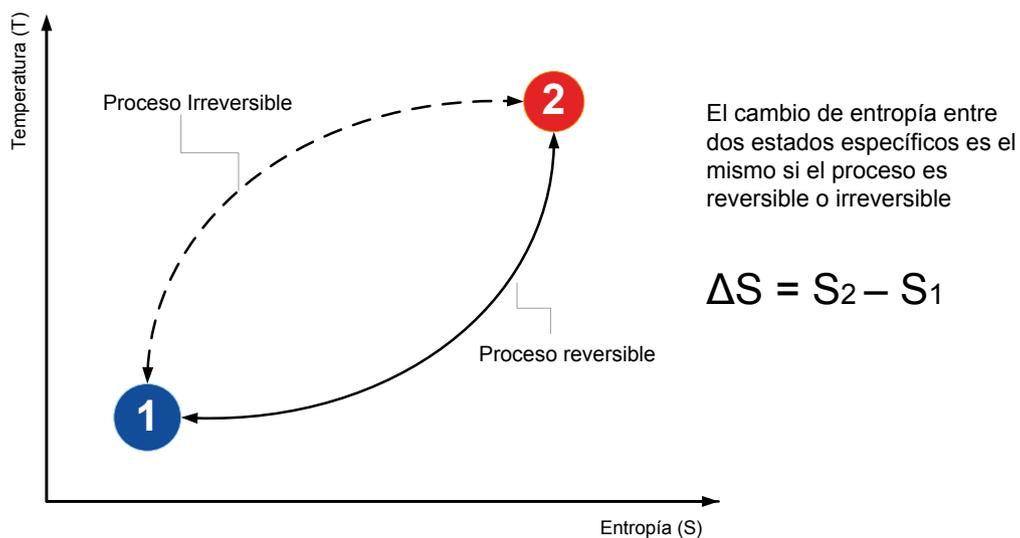
Principio termodinámico	Interpretación urbana	Ejemplo
Ley cero. Si dos sistemas están en equilibrio con un tercero, entonces deben estar en equilibrio entre ellos.	Ley cero. Si dos urbes están en equilibrio con una tercera, entonces todas deben estar en equilibrio.	Homogenización del paisaje urbano regional y/o global. Búsqueda de cobertura total de servicios dentro de la ciudad y los alrededores.
Primera ley. En un proceso cíclico, el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado.	Primera ley. En los procesos urbanos, el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado para su mantenimiento y crecimiento.	Fenómeno de isla de calor (concentración de altas temperaturas en el casco urbano en comparación con la periferia).
Segunda ley. Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo y no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo a baja temperatura a otro de alta temperatura.	Segunda ley. Es imposible construir una ciudad cuya dinámica específica no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor entre zonas que se encuentren con distintas temperaturas.	El consumo energético urbano para la movilidad alcanza eficiencias cercanas al 40 %; razón por la cual parte de la energía se pierde en forma de ruido y calor y, asimismo, en formas de materia no aprovechables como los gases de combustión.
Tercera ley. La entropía de una sustancia pura en equilibrio termodinámico tiende a cero cuando la temperatura de la sustancia pura se acerca al cero absoluto.	Tercera ley. La entropía de una ciudad podrá alcanzar un valor nulo cuando su temperatura se acerque al cero absoluto.	En época de invierno las ciudades tienden a expresar menos desorden que en época de verano. Igualmente, urbes ubicadas en pisos térmicos altos tienden a ser más ordenadas.

En el escenario urbano, los *principios cero y primero* explican que toda forma de energía (eléctrica, radiación solar, química asociada a los combustibles y alimentos) que fluya, se utilice o transforme en la ciudad determinará que la región y las zonas del conurbano, áreas rurales y ecosistemas estratégicos tiendan a alcanzar estados pseudoestables de naturaleza energética con el polo de mayor

consumo; hecho que se verifica, de la manera más simple, con una distribución radial de depósitos y usos de energía, expresada en diferentes valores de temperatura en el espacio tiempo (tendencia relacionada con el fenómeno de isla de calor)<sup>3</sup>, así como en la distribución de la infraestructura, cobertura y existencia de servicios e índices de desarrollo humano, entre otros.

Este aumento de temperatura en la ciudad se atribuye al comportamiento *energívoro* para mantener operaciones asociadas con transporte de personas, materiales e insumos, transformación de formas de materia, energía e información, construcción de obras civiles, prestación de servicios para el divertimento, gestión de cualquier tipo de residuo, etc. Toda una expresión del trabajo realizado para mantener la vida urbana. Situación contraria a las condiciones de frontera (límite urbano) y los alrededores, en donde la temperatura es menor debido al dominio de paisajes poco intervenidos, menor densidad poblacional y menor flujo de materia y energía. Este fenómeno también se debe al rigor y certeza de la *segunda ley*, puesto que no es posible aprovechar en su totalidad la energía que fluye dentro, hacia y desde la ciudad.

Con relación a la *entropía*, es importante aclarar que es una propiedad con valores fijos en estados fijo; por consiguiente, “el cambio de entropía  $\Delta S$  entre dos estados es el mismo sin importar que trayectoria –reversible o irreversible– sigue el proceso” (Cengel y Boles, 2012, p. 334) (véase figura 1).



**Figura 1.** Cambio de entropía entre dos estados y trayectorias reversible o irreversible.

*Fuente:* elaboración propia, con información de Abbott y van Ness (1975), Cengel y Boles (1994), Cengel y Boles (2012).

Por tanto, su uso en procesos irreversibles es viable y necesario, más cuando su cambio siempre es mayor que la transferencia de entropía (ecuación 4).

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores} \tag{4}$$

<sup>3</sup> Las islas de calor o islas térmicas urbanas se refieren al gradiente térmico que se observa entre los espacios urbanos densamente ocupados y construidos y la periferia rural o periurbana (EPA, 2009).

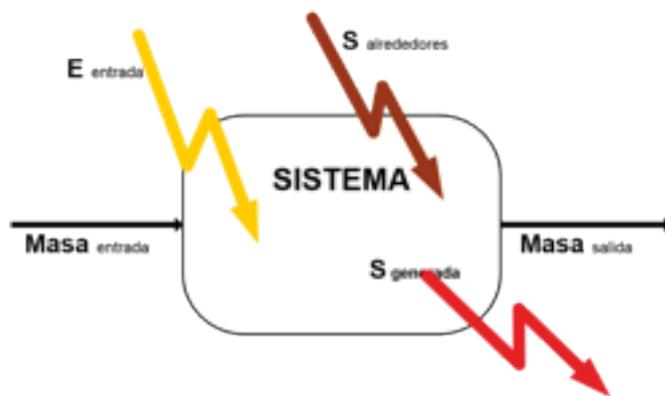
Considerando la ciudad y teniendo en cuenta que la entropía es una propiedad extensiva y dependiente de la materia, su valor total se definirá por la sumatoria de todos los subsistemas urbanos existentes.

Asimismo, al existir un flujo entrópico proveniente del mundo externo y una producción de entropía propia del sistema, la irreversibilidad toma importancia debido a que todos los procesos naturales, los correspondientes a sistemas colaborativos cognitivos y ciertos constructos humanos (como las ciudades) involucran un aumento de la entropía total. Es decir, expresan el principio de incremento de la entropía (ecuación 5).

$$S_{Total} > 0 \tag{5}$$

Sin embargo, es importante aclarar que este postulado no implica que un sistema abierto no pueda disminuir su entropía total; esto es posible si la disipa hacia los alrededores ( $\delta S$  positivo). Esta externalidad del sistema urbano le permite mantener un estado pseudo estable bajo la imparitable generación de entropía interna.

En este orden de ideas, al ser la ciudad un sistema complejo que energéticamente se comporta como una máquina térmica, su aparente estado ordenado se logra cediendo entropía positiva al medio circundante (es decir, desordenándolo en forma de calor, flujos no aprovechables de materiales y sustancias químicas peligrosas), al tiempo que captura entropía negativa (Bettini, 1998) (figura 2). Al final de cuentas, se puede inferir que a mayor flujo y acumulación de materiales en la ciudad se generará un mayor desorden, el cual se verifica ambientalmente como vertimientos, emisiones, residuos sólidos, ruido, residuos peligrosos, deterioro de suelos, pérdida de biodiversidad, entre otros. Pero también, en problemas cotidianos de los ciudadanos, como los embotellamientos de tráfico, la pérdida o intermitencia en el suministro de algún servicio público, el deterioro de la infraestructura urbana y la reducción en la calidad de servicios de salud, por mencionar los más apremiantes.



**Figura 2.** Esquema representativo de los flujos de materia, energía y entropía en un sistema.

Así las cosas, el trabajo termodinámico en el que incurre la ciudad para mantener un orden aparente del sistema y evitar su muerte térmica conlleva la paradoja de generar mayor entropía interna y, por ende, la disipación; hecho que Lewis Mumford (1961) evidenció al comparar la ciudad con la Reina Roja de *Alicia a Través del Espejo*: “Realizando grandes esfuerzos y alcanzando una velocidad vertiginosa, logra a duras penas mantenerse en la misma posición”.

Finalmente, a manera de conclusión preliminar, se puede decir que el crecimiento urbano, la conurbación y la consolidación de áreas y zonas metropolitanas generarán inevitablemente un

mayor nivel de entropía, que incrementará el deterioro ambiental, acrecentará el desorden en las redes de flujo y medrará la calidad de vida de sus habitantes. De igual manera, simplificará el medio ambiente y los asentamientos humanos próximos, sometiéndolos a una mayor inestabilidad, sustrayéndoles capacidad homeostática, acelerando los procesos de degradación y, naturalmente, aumentando su vulnerabilidad.

### **LA GESTIÓN DE LA ENTROPÍA URBANA Y EL AUMENTO DE DISIPACIÓN**

Considerando que la producción de entropía contiene -desde la dialéctica- un elemento creador de desorden y otro creador de orden (Prigogine, 2008 y 2012), queda claro que, aunque el caos es una propiedad inherente a la existencia urbana, el reto de las ciudades está en gestionar el continuo incremento de entropía. Algo que no ha sido considerado en los planes de mejoramiento, planeación y política urbana.

Históricamente, las ciudades han tratado de relocalizar las expresiones de desorden que las aquejan, tomando acciones como: a) conducir las aguas servidas y demás vertimientos por sistemas de alcantarillado, para después entregarlas a cuerpos de agua receptores; b) recoger y conducir los residuos sólidos a zonas próximas al casco urbano para su disposición final, y c) liberar al aire los gases contaminantes esperando que estos se diluyan, entre las expresiones más comunes. Hoy día, dichas prácticas se mantienen con la variación de incluir sistemas de tratamiento para mitigar el impacto ambiental y, en menos ocasiones, modificando los procesos generadores del problema para prevenir parcialmente la contaminación.

En resumen, estas actividades se concentran en transferir el problema a otro territorio, reubicar el contaminante, cambiar su fase/estado (llevándolo de sólido a líquido, por ejemplo) o deshaciéndose rápidamente del material, la especie química o la forma de energía, lo que en términos de la economía ambiental se considera como una externalidad negativa.<sup>4</sup> Simplemente, la ciudad acumula contaminantes o los relocaliza en sus alrededores, transfiriéndole el problema a otros sin consulta previa.

Un aspecto adicional en la crisis ambiental de la ciudad corresponde a las acciones de prevención y control de la contaminación. Toda la técnica, tecnología, recursos financieros, materiales, energía y talento humano que se destinan para mejorar el desempeño ambiental urbano sucumben ante la certeza e infalibilidad de la entropía, ya que “por cada estructura ordenada que producimos en nuestro mundo, se generará también una cantidad aún mayor de desorden” (Brown, Lemay y Bursten, 1991, p. 753).

Esta paradoja termodinámica -que rige todo constructo de origen antrópico- genera el siguiente contraste urbano: unas muy pocas localidades, barrios o zonas alcanzan una gran cualificación urbanística y calidad ambiental; mientras que las áreas restantes -la mayor parte- terminarán afectadas y degradadas al ser receptoras de las externalidades negativas. Asimismo, se presentarán tensiones y desequilibrios con el conurbano, que tendrá que coexistir con áreas deterioradas, zonas de disposición final de residuos y urbanización forzada e ilegal en terrenos de alto riesgo.

<sup>4</sup> Una externalidad negativa se define como un efecto externo -producto de la rigidez del mercado- que sufre una o varias personas por acciones u omisiones de otras, y que no se refleja en los precios, lo que implica que los beneficios o costos directos de una actividad no reflejan todos los costos totales generados por dicha actividad (Delacámara, 2008).

## CONCLUSIÓN

El crecimiento urbano y su intento de cualificación exigirán el sacrificio de áreas internas, zonas rurales o ecosistemas estratégicos, que debería ser dimensionado y declarado por los gestores urbanos, compensado a los damnificados y comunicado a los beneficiarios.

La termodinámica clásica puede ser útil para comprender la generación de desorden urbano y la irreversibilidad de los procesos, siendo representados a través del concepto de la entropía. Dicha propiedad dependiente de la materia permite reconocer que la contaminación es una expresión de flujos no aprovechables de energía y materia que afectan la homeóstasis del sistema urbano, y que es capaz de generar cambios de estado, para los que una ciudad o asentamiento humano puede no estar preparado.

A diferencia de las ciudades y demás artificios humanos, los sistemas naturales logran reducir el nivel de entropía a medida que se asciende en la cadena trófica, al transformar el desorden en información útil. Condición envidiable que nunca lograrán las urbes, lo que exige hallar alternativas para viabilizar el control del caos o reducir su magnitud, reconociendo, naturalmente, la validez de la tercera ley de la termodinámica, que declara la inviabilidad de reducir el desorden de un sistema, a no ser que se reduzca la temperatura en su interior y alrededores.

Es decir, la entropía alcanzará un valor cero si y solo si la temperatura alcanza el cero absoluto (-273 °C). Estado restrictivo imposible de sortear, puesto que no existe proceso alguno capaz de llegar a dicho límite inferior en un número finito de pasos. En síntesis, la ciudad tendrá que coexistir con su propiedad genética de generar desorden, a no ser que muera, colapsando totalmente; lo que la convierte en una estructura disipativa que solo puede existir en conjunción con el conurbano, la frontera agrícola y demás zonas de abasto y provisión.

La entropía generada en una ciudad puede ser gestionada en tres grandes formas, a saber: mediante su disipación interna o externa, almacenándola en depósitos dentro del asentamiento humano o en su periferia y convirtiéndola en información útil para las organizaciones, comunidades e individuos. Sin embargo, el valor de esta se incrementará hasta que se presente un cambio de estado debido a la superación de la homeostasis del sistema complejo.

## REFERENCIAS

- Abbott, M., y van Ness, H. (1975). *Termodinámica, teoría y problemas*. Cali, Colombia: MacGraw-Hill.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Iniciativa ciudades emergentes y sostenibles. Recuperado de <http://www.iadb.org/en/topics/emerging-and-sustainable-cities>
- Bettini V. (1998). La ciudad como sistema disipador. En *Elementos de Ecología Urbana*. Valladolid. Editorial Trotta.
- Brown, T., LeMay, E., y Bursten, B. (1991). *Chemistry: the central science*. New York, EE. UU.: Prentice Hall Inc.
- Cengel, Y., y Boles, M. (1994). *Thermodynamics*. New York. EE. UU.: McGraw Hill.
- Cengel, Y., y Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México: McGraw Hill.
- Curtit, G. (2003). *Ciudad, gestión local y nuevos desafíos ambientales: reflexiones en torno a las políticas neoliberales y sus efectos sobre nuestros territorios*. Buenos Aires: Centro de Investigaciones Ambientales y Espacio Editorial.

- Daly, H. (2001). Beyond growth: avoiding uneconomic growth. En M. Munasinghe, O. Sunkel, C. de Miguel (Eds.), *Sustainability of long term growth: Socioeconomic and ecological perspectives* (pp.185 - 203). Glos, Reino Unido: Edward Elgar Publishing Limited.
- Delacámara, G. (2012). Análisis económico de externalidades ambientales, guía para decisores (Documentos de proyectos n.º 200). Santiago de Chile: German Agency for Technical Co-operation-UN. Cepal.
- Delgado, G. (2012). Metabolismo urbano y transporte. En *Transporte, ciudad y cambio climático*. México D. F. México: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Díaz, C. (2011). *Metabolismo de la ciudad de Bogotá D.C.: una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana*. Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Díaz, C. (2012a). La ciudad, entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible. En *Degrowth in the Americas, Congres Book*. Montreal, Canadá: Concordia University.
- Díaz, C. (2012b). *Bogotá D. C.: entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible* (Cuadernos de Utopía Colombia n.º 2). Bogotá D.C.: Universidad Central.
- Díaz, C. (2014). Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina*, 2(2), 51-70.
- Díaz, C., y León, N. (2012). Bogotá D.C.: indicadores de insostenibilidad ambiental. En *Congreso Latinoamericano de Ecología Urbana*. Ponencia presentada en Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires, Argentina.
- Díaz, C., Marín, R., y Silva, J. (2015). Metabolismo hídrico de Bogotá: el gran reto urbano de la gestión del agua. En R. Marín, C. Díaz y G. Gutiérrez (Eds.), *La pobreza del agua, soluciones en momentos de crisis* (pp. 107-137). Bogotá D. C.: Universidad Central.
- Gómez, C. (2002). Crecimiento económico y desarrollo sostenible. En J. Jiménez (Ed.), *Economía y territorio* (pp.19-44). Madrid: Civitas
- Guthrie, J. (1963). *Economía* (Manuel de J. Fernández, trad., 1ª ed.). México D. F: UTEHA.
- Keena, J., y Shapiro, A. (1947). History and exposition of the Laws of thermodynamics. *Mechanical Engineering*, 69, 915 – 921.
- Malthus, T. (1798). *An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society, with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and other writers*. Londres: J Johnson, in St Paul's Church-yard.
- Martine, G., McGranahan, G., Montgomery, M., y Fernández-Castilla, R. (Eds.). (2008). *The new global frontier: urbanization, poverty and environment in the 21st century*. London: Earthscan.
- Meadows D. y Meadows D. y Randers J. (1994). *Más allá de los límites del crecimiento*. Madrid, España.: El País Aguilar. p 29.
- Munford L. (1961). *The city in history*. New York: Harcourt, Brace & Company.
- Prigogine, I. (2008). *Las leyes del caos* (Juan Vivanco, trad.). Barcelona, España: Crítica.
- Prigogine, I. (2012). *El nacimiento del tiempo*. Buenos Aires: Tusquets Editores.

- Randers, J. (2012). *2052 - A Global Forecast for the Next Forty Years*. Londres: Chelsea Green Publications.
- Russell, L., y Adebisi, G. (1993). *Classical thermodynamics*. Florida, EE. UU.: Saunders College Publishing.
- Sánchez-Rodríguez, R. (2008). Urban sustainability and global environmental change: reflections for an urban agenda. En G. Martine, G. McGranahan, M. Montgomery y R. Fernández-Castilla (Eds.), *The new global frontier: urbanization, poverty and environment in the 21st century* (pp. 149-164). Londres: Earthscan.
- Smith, J., van Ness, H., y Abbot, T. (1996). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. New York, EE. UU.: McGraw-Hill.
- Thatcher, M. (1989). *Commonwealth partners at odds over environmental problems*. "Globe and mail". Toronto: Margaret Thatcher Foundation.
- Tacoli, C., McGranahan, G., y Satterthwaite, D. (2008). Urbanization, poverty and inequity: is rural-urban migration a poverty problem, or part of the solution? En G. Martine, G. McGranahan, M. Montgomery y R. Fernández-Castilla (Eds.), *The new global frontier: urbanization, poverty and environment in the 21st century* (pp. 37-54). Londres: Earthscan.
- Thurow, L. (1982). *La sociedad de suma cero*. Barcelona, España.: Ediciones Orbis S. A.
- Toledo, V. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económica-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7,1-26.
- United Nations (2000). *Informe del Milenio del Secretariado General*. New York. EE. UU.: Naciones Unidas.
- Naciones Unidas. (2018). *Sustainable Development Goals, 17 goals to transform our world*. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment>
- United Nations Development Program. (2009). *Informe sobre el desarrollo humano*. Recuperado de <http://undp.org/es/desarrollohumano/origenes/>
- United Nations Human Settlements Programme. (2011). *State of the World's Cities 2010/2011: Bridging the urban divide*. Londres: UNHabitat.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2008). *World urbanization prospects: the 2007 revision*. New York, EE. UU.: UNDESA.
- Sustainable Development Solutions Network. (2017). *Cómo implementar los ODS en las ciudades; un manual introductorio para quienes trabajan en el ámbito del desarrollo urbano sostenible*. New York: UNSDSN y German Cooperation.
- Yusuf, S. (2009). *Development economics through the decades: a critical look at 30 years of the world development report*. Washington, EE. UU.: The World Bank
- Zhang, Y., Yang, Z., y Yu, X. (2009). Evaluation of urban metabolism based on emergy síntesis: a case study for Beijing China. *Ecological Modelling*, 220(13-14), 1690-1696.