

Metabolismo y termodinámica urbana

Estudio de sostenibilidad
ambiental de ciudades
capitales en Latinoamérica

Cristian Julián Díaz Álvarez



Metabolismo y termodinámica urbana



Estudio de sostenibilidad
ambiental de ciudades
capitales en Latinoamérica

Metabolismo y termodinámica urbana

Estudio de sostenibilidad
ambiental de ciudades
capitales en Latinoamérica

Cristian Julián Díaz Álvarez



Díaz Álvarez, Cristian Julián.

Metabolismo y termodinámica urbana. Estudio de sostenibilidad ambiental de ciudades capitales en Latinoamérica

Villavicencio: Corporación Universitaria del Meta, enero del 2025.

241 páginas: Mapas, cuadros, gráficas y fotografías a color.

ISBN: 978-628-7636-22-4 (versión electrónica)

ISBN: 978-628-7636-20-0 (versión física)

Urbanismo y planificación Urbana 2. Sostenibilidad ambiental
urbana en Latinoamérica. 3.ciudades capitales
307.76 D41m. Sistema de Clasificación Decimal Dewey 22° edición
Corporación Universitaria del Meta – UNIMETA

Metabolismo y termodinámica urbana. Estudio
de sostenibilidad ambiental de ciudades
capitales en Latinoamérica

Cristian Julián Díaz Álvarez
Autor

Nancy Espinel Riveros
Presidenta Sala General

Leonor Mojica Sánchez
Rectora

Manuel Humberto Paérez Baquero
Vicerrector General y de la Calidad

Cristian Julián Díaz Álvarez
Vicerrector Académico, Investigaciones y
Proyección Social

Janeth del Pilar Vaca Devia
Vicerrectora de Postgrados, Investigaciones y
Proyección Social

**Editorial Corporación Universitaria
del Meta–UNIMETA**
Carrera 32 No. 34B-26, Campus San Fernando
Villavicencio, Meta (Colombia)
Teléfono: (57-8) 662 1825 Ext. 130 Fax: 662 1827
<https://www.unimeta.edu.co>
<http://www.editorial.unimeta.edu.co>

Comité Editorial

Leonor Mojica Sánchez
Rectora

Cristian Julián Díaz Álvarez
Vicerrector Académico, Investigaciones y
Proyección Social

Janeth del Pilar Vaca Devia
Vicerrectora de Posgrados, Investigaciones y
Proyección Social

René Ricardo Cuéllar Rodríguez
Director de Investigaciones y Proyección Social

Leonor Mojica Sánchez
Sergio Andrés Alfaro Marengo
Editores

**Corrección de estilo, armada electrónica e
impresión**
Proceditor
proceditor@yahoo.es

© 2025, Corporación Universitaria del Meta -
UNIMETA
ISBN (impreso): 978-628-7636-20-0
ISBN (digital): 978-628-7636-22-4
enero de 2025
Villavicencio, Meta. Colombia

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistema recuperable o transmitida en ninguna forma por medios electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros, sin la previa autorización por escrito de la Editorial Corporación Universitaria del Meta-UNIMETA y de los autores. Los conceptos expresados en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente corresponden con los de la Corporación Universitaria del Meta-UNIMETA y da cumplimiento al Depósito Legal según lo establecido en la Ley 44 de 1993, los Decretos 460 de 1995, el 2150 de 1995, el 358 de 2000 y la Ley 1379 de 2010.

Índice general

Prólogo	13
Síntesis	21
Introducción	25
1. La ciudad como sistema complejo: anomalía, pseudoestabilidad y homeostasis urbana	37
1.1. La complejidad urbana y su anomalía	39
1.2. Sistemas pseudoestables alejados del equilibrio	42
1.3. El amortiguamiento a partir de los constructos matemáticos	44
1.4. Pseudoestabilidad, retroalimentación y homeostasis	48
1.5. Homeostasis, la ley de Hook y la segunda ley de Newton	52
1.6. El amortiguamiento y la homeostasis	55
1.7. Operación del planteamiento matemático	61
2. Metabolismo urbano y entropía en las principales ciudades capitales de Latinoamérica	67
2.1. El sistema termodinámico abierto	70
2.2. El metabolismo y la complejidad urbana en Latinoamérica.....	72
2.3. Estudios de metabolismo en Latinoamérica	74
2.4. Las condiciones iniciales en Latinoamérica: los pueblos originarios, el agua, la fundación y la Colonia	75
2.5. Los pueblos originarios y el agua.....	77
2.6. El devenir de las ciudades latinoamericanas.....	80
2.6.1. Las ciudades y su área metropolitana.....	81
2.6.2. Bogotá	89
2.6.3. Buenos Aires.....	94
2.6.4. Lima	96
2.6.5. Ciudad de México	99
2.6.6. Santiago	104
2.7. El metabolismo en cifras.....	107
2.7.1. Población	107
2.7.2. Producto interno bruto.....	109
2.7.3. Consumo y pérdidas de agua.....	110

2.7.4. Consumo de energía eléctrica y combustibles.....	113
2.7.5. Consumo de alimentos y bebidas	116
2.7.6. Basuras producidas	117
2.7.7. Emisiones de gases efecto invernadero	119
2.8. La disipación y el riesgo de colapso.....	122
3. Entropía en la ciudad: complejidad, gestión y disipación	129
3.1. En el filo de la oportunidad y el espejismo del crecimiento	132
3.2. Aproximación urbana desde la termodinámica clásica	138
3.2.1. Formulación no atomista de las leyes de la termodinámica	139
3.2.2. Aplicación de los principios al caso urbano	144
3.3. La entropía urbana desde la perspectiva de la termodinámica no atomista	147
3.4. Contribuciones de la entropía a los estudios urbanos.....	151
3.5. Aproximación matemática a la entropía urbana	156
3.6. La gestión de la entropía urbana y el aumento de disipación	163
3.7. Supervivencia urbana y sostenibilidad ambiental.....	166
4. Ciudades del futuro	169
4.1. Ciudades de baja entropía.....	171
4.2. Reconstrucción y ordenamiento.....	176
Conclusiones	181
Referencias	197
Glosario	233
Anexo 1.	239
Anexo 2.	245

Índice de tablas

Tabla 1a.	Tipo de amortiguamiento en función de las raíces posibles para una vibración amortiguada y su comparación con la condición homeostática y la retroalimentación negativa	56
Tabla 1b.	Descripción de los principales elementos que —en estructura— consolidan la homeostasis como propiedad emergente de una ciudad.....	63
Tabla 1c.	Descripción de los principales elementos que se consideran en la retroalimentación del sistema ante una perturbación	65
Tabla 1d.	Descripción de los principales elementos que se consideran en la perturbación que afecta a una ciudad.....	66
Tabla 2a.	Criterios de selección para escoger las cinco principales ciudades capitales para el estudio.....	71
Tabla 2b.	Información básica de las ciudades capitales analizadas en el contexto de metropolización(a)	84
Tabla 2c.	Contexto histórico y condiciones iniciales —pueblos originarios— de las ciudades capitales.....	86
Tabla 2c.	Información de los principales flujos de materia y energía para Bogotá, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025	93
Tabla 2e.	Información de los principales flujos de materia y energía para Buenos Aires Ciudad, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025	95
Tabla 2e.	Información de los principales flujos de materia y energía para Lima (no incluye Callao), para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025	97
Tabla 2f.	Información de los principales flujos de materia y energía para Ciudad de México, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025	103
Tabla 2g.	Información de los principales flujos de materia y energía para Santiago de Chile Ciudad, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025	105
Tabla 3a.	Advertencias sobre las principales fuerzas impulsoras que pueden exacerbar los conflictos sociales y ambientales en las ciudades.....	134
Tabla 3b.	Definición y aplicación de los principios termodinámicos en las ciudades.....	145
Tabla 3c.	Entropía, entropía negativa o neguentropía	150

Tabla 3d.	Algunas contribuciones en el uso del concepto y desarrollo matemático de la entropía en los estudios urbanos.....	153
Tabla 3e.	Principales elementos urbanos que contribuyen a la generación de entropía dentro de la ciudad.....	157
Tabla 3f.	Principales elementos urbanos en la categoría de contaminación que contribuyen a la generación de entropía dentro de la ciudad.....	158
Tabla 3g.	Principales elementos de los alrededores urbanos que generan entropía al sistema ciudad	159
Tabla 3h.	Símbolos, coeficientes sigma y unidades de los elementos considerados en este estudio que generan la disipación o coadyuvan en ella	161
Tabla 3i.	Formas de relocalización de las expresiones del desorden urbano.....	164
Tabla 4a.	Algunos proyectos urbanos que se han llevado a cabo para alcanzar crecimiento cero en horizontal de área urbana, renovación urbana e inserción de la naturaleza	178
Tabla 1.	Supuestos de relación entre los elementos de estudio para el metabolismo urbano de las ciudades capitales analizadas	247

Índice de figuras

Figura 1a. Representación gráfica del concepto de “sobrepaso” (“overshoot”) según el Club de Roma.....	46
Figura 1b. Principales constructos matemáticos que explican la retroalimentación y la homeostasis en los sistemas naturales.....	48
Figura 1c. Mapa mental de los conceptos de “estabilidad”, “homeostasis”, “evolución”, “estado” y “perturbación” en los sistemas complejos.....	50
Figura 1d. Representación gráfica de la estabilidad, perturbación y zona de no equilibrio para dos condiciones distintas: 1) oscilación dentro del límite de vulnerabilidad del sistema y 2) oscilación y superación del límite de vulnerabilidad del sistema	51
Figura 1e. Sistema masa-resorte-amortiguamiento.....	54
Figura 1f. Solución gráfica de un sistema perturbado que exhibe una homeostasis significativa. Sistema sobreamortiguado	57
Figura 1g. Solución gráfica de un sistema perturbado que exhibe una homeostasis complementada con una fuerte retroalimentación negativa. Sistema críticamente amortiguado	58
Figura 1h. Solución gráfica de un sistema perturbado que exhibe una homeostasis reducida	59
Figura 1i. Representación del sistema perturbado de forma continua (nótese que con dificultad llegará al punto de estabilidad o equilibrio).....	60
Figura 2a. Criterios de selección utilizados para escoger las ciudades capitales objeto de estudio.....	71
Figura 2b. Ciudades de Latinoamérica donde se han realizado estudios de metabolismo urbano. Periodo 2010-2023.....	76
Figura 2c. Comportamiento de la población en las ciudades de Bogotá, Buenos Aires, Lima y Santiago. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025.....	108
Figura 2c. Comportamiento del PIB de las ciudades capitales en el periodo 2000-2015, con proyección a 2025.....	110
Figura 2e. Comparativo del consumo de agua (distribución, m ³ /s) para las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección 2025.....	111
Figura 2e. Comparativo de las pérdidas la conducción (agua no contabilizada, porcentaje) para las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección 2025	112

Figura 2f. Comportamiento en el consumo de energía eléctrica (GWh) de las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025.....	114
Figura 2g. Comportamiento en el consumo de gasolina (kt/año) de las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025.....	115
Figura 2h. Comportamiento en el consumo de “fuel oil” (kt/año) de las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025.....	116
Figura 2i. Consumo de alimentos (kt/año) en las ciudades latinoamericanas objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025.....	118
Figura 2j. Consumo de bebidas (m3/año) en las ciudades latinoamericanas objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025.....	119
Figura 2k. Cantidad de basuras producidas (t/día) en las ciudades capitales objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2015	120
Figura 2l. Emisiones de gases efecto invernadero (Kt CO ₂ eq) en las ciudades latinoamericanas objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección 2025	121
Figura 3a. La mal llamada curva ambiental de Kuznetz	135
Figura 3b. La curva ambiental de Kuznetz y su relación con el crecimiento económico, la dinámica poblacional y el ingreso per cápita.....	137
Figura 4c. Cambio de entropía entre dos estados y trayectorias reversible o irreversible	148
Figura 3d. Esquema representativo de los flujos de materia, energía y entropía en un sistema abierto	150
Figura 3e. Gestión de la entropía urbana	165
Figura 4a. Propuesta de metabolismo circular en las ciudades latinoamericanas	174
Figura 1. Representación de la ley de Hook y la segunda ley de Newton en el sistema masa-resorte.....	241
Figura 2. Solución gráfica de un sistema mecánico ideal que no exhibe homeostasis tras una perturbación	243
Figura 3. Estructura conceptual que sustenta la propuesta descriptiva y de aproximación matemática a la capacidad homeostática con apoyo en los sistemas amortiguados.....	244
Figura 1. Representación de la ley de Hook y la segunda ley de Newton en el sistema masa-resorte.....	241

Figura 2.	Solución gráfica de un sistema mecánico ideal que no exhibe homeostasis tras una perturbación	243
Figura 3.	Estructura conceptual que sustenta la propuesta descriptiva y de aproximación matemática a la capacidad homeostática con apoyo en los sistemas amortiguados.....	244

Índice de mapas

Mapa 2a.	Comportamiento de la población, del consumo de alimentos y de la generación de basuras para los años 2010, 2015 y proyección a 2025, para Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago.....	125
Mapa 2b.	Comportamiento de la población, del consumo de energía eléctrica y del valor del PIB para los años 2010, 2015 y proyección a 2025, para Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago.....	126
Mapa 2c.	Comportamiento de la población, del consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases GEI para los años 2010, 2015 y proyección 2025, para Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago.....	127
Mapa 2d.	Comportamiento de la población, del consumo de agua potable (distribución y facturación), del agua no contabilizada (pérdida), del consumo de agua en botella y los vertimientos para los años 2010, 2015 y proyección 2025, Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago.....	128

Prólogo

*Toda acción humana, aunque no pertenezca al mundo “material”,
puede tener un coste en términos de energía y materiales
y un impacto cuantificable en el medio natural.*

González de Molina y Toledo

(Metabolismos. Naturaleza e historia)

La civilización occidental vive hoy una crisis socioambiental que compromete su existencia en el planeta, sobre todo por el crecimiento poblacional y el consumo exacerbado de recursos materiales y energéticos. Dicha crisis comenzó principalmente desde el comienzo de la Revolución Industrial junto con la consagración del sistema capitalista, mediante la producción intensiva de mercancías y el comercio y la imposición de una ideología sustentada en el crecimiento económico ilimitado dentro de un planeta cuyos recursos son finitos.

Esta línea de pensamiento provocó una enorme migración de población rural a las polis, bajo la promesa de adquirir mejores condiciones de vida, sobre todo desde el punto de vista económico y material. Esto causó un crecimiento urbano sin precedentes en la historia del hombre, pues hoy las ciudades son las mayores consumidoras de recursos en el planeta —agua, materiales, energéticos—, al tiempo que generan gran cantidad de desechos y contaminación. De esta manera, llegan a ser protagonistas de la crisis ambiental actual.

Así pues, el problema central de este libro es comprender el modo en que las ciudades consumen hoy recursos; así mismo, explicar su crecimiento desordenado y horizontal —dominante en los países del sur— y los efectos socioambientales que acarrearán, es decir, su metabolismo.

Desde tiempos de *El capital*, de Marx, en el cual se señala que existe una relación estrecha de la naturaleza y las sociedades expresada por medio de la extracción de recursos para que estas puedan desarrollarse, hasta la actualidad, cuando se sabe que las ciudades son sistemas abiertos que se sujetan a las leyes de la termodinámica, se vuelve indispensable el estudio de las relaciones sociourbanas naturaleza.

Estos análisis, junto con lo que se presenta en este libro, proponen una mirada de la complejidad que guardan estas conexiones, pero

también un enfoque que permita alcanzar una sustentabilidad que se sustenta en los límites de la Pachamama ante las acciones humanas, de tal manera que las planeaciones territoriales y urbanas puedan gestionar y administrar de una manera más eficiente los consumos urbanos, se planee mejor el crecimiento de las ciudades y existan entonces mejores condiciones de vida para sus habitantes. Al mismo tiempo se abre la oportunidad a un cambio profundo de paradigma ante el inminente desplome del sistema capitalista, que hasta hoy nos está llevando al colapso.

Por tanto, el metabolismo urbano abarca la inter- y la transdisciplina, pues son los aspectos sociales los que influyen en la relación con la naturaleza, al establecer los paradigmas e ideologías que determinan en el comportamiento de las personas; pero la ingeniería y la administración permiten diseñar los procesos de consumo y eficiencia. De tal suerte que hoy los estudios metabólicos se presentan como indispensables al momento de hablar de sustentabilidad urbana y gestión de recursos.

No obstante, en América Latina los estudios metabólicos apenas comienzan a florecer, por la poca o nula disponibilidad de datos, cuestiones burocráticas y trabajo que implica la minería de datos. Con todo, se abre la oportunidad de conocer la situación termodinámica de las ciudades latinoamericanas y comenzar a hacerlas más resilientes ante su ya inherente vulnerabilidad.

Por tanto, invito al lector a revisar este libro como una puerta al conocimiento, al aprendizaje y a la reflexión, en virtud de que todos somos los actores que determinamos el modo de vida en que nos queremos conducir en nuestras ciudades, al tiempo que también debemos asumir las consecuencias de lo que hemos hecho y a construir la oportunidad de un mejor futuro que nos garantice una mejor calidad de vida.

Dainiz Noray Montoya García

Docente del Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México



Agradecimientos

A Dios Padre, por la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, el cual espero sea para el beneficio de la sociedad.

A mi familia: Pablo, Carolina, Álex y Josefina, por el sacrificio realizado al ceder tiempo y recursos para la realización de mis estudios, y por sus oraciones.

A los profesores Roberto Rivera Pérez, Ana Laura Montero Ocampo y Sandra Durán Durán, por haber brindado los espacios interdisciplinarios entre la ingeniería, la economía y las ciencias sociales.



Dedicatoria

A mi mamá, gestora de la vida y protectora incansable. Dios te bendiga por todo el esfuerzo realizado para que tus hijos seamos buenos hombres.

Al profesor Pablo Leyva Franco, por su gran deferencia académica, por su amistad y guía profesional en la dimensión ambiental



Síntesis

Esta investigación versa sobre los principales constructos humanos, las ciudades, concebidas como sistemas complejos que logran subsistir gracias a la enorme transferencia de materia, energía e información en su interior, desde los alrededores y hacia allí; así mismo, gracias a procesos internos que les permiten alcanzar estados pseudoestables en condiciones alejadas del equilibrio termodinámico.

Así las cosas, se realiza una aproximación matemática al proceso de amortiguamiento de las perturbaciones que permite demostrar la forma como la retroalimentación negativa y la homeostasis en una ciudad logran retardar el cambio de estado del sistema ante el incesante y necesario flujo de materiales y formas de energía.

Este comportamiento heterótrofo de consumo se estudia en las ciudades capitales de Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Ciudad de México, Lima y Santiago, analizando el metabolismo urbano para los años 2000, 2005, 2010, 2015 hasta la actualidad, con una proyección al año 2025. Esta tendencia evidencia no solo una creciente demanda de agua, energía eléctrica, combustibles, alimentos y bebidas, sino un aumento en la cantidad de basuras, gases de efecto invernadero (GEI) y volumen de vertimientos.

Estas expresiones de la entropía generada incrementan el riesgo de bifurcación termodinámica y se consideran en el funcional matemático Sigma S (ΔS), que expresa su variación en función del cambio interno y los alrededores de 18 elementos del metabolismo y estructura urbana regional. Se llega a la conclusión de que la aproximación termodinámica de la dimensión ambiental urbana puede ayudar a evitar el colapso urbano y finalmente se propone que la sostenibilidad ambiental urbana puede definirse en función de ΔS .



Introducción

[...] Esta ciudad no la entendemos. A esta falta de comprensión hacia el tipo de ciudad en que vivimos se debe la crisis de la sociedad urbana [...]

Francisco Javier Sáenz de Oiza.

Diario 16

La continua concentración de la población, actividades económicas y servicios en las grandes ciudades y asentamientos humanos, además del incremento de infraestructura monumental y la expansión urbana, constituyen hoy en día un reto social, político, económico, cultural y ambiental para asegurar su propia subsistencia y para evitar el agotamiento de las regiones circundantes, la ruralidad y ecosistemas estratégicos de abasto y provisión. Esta realidad, que se agudizará en la primera mitad del siglo XXI, presenta dos grandes escenarios “dialécticos” en continua disputa, principalmente en países en desarrollo y economías emergentes, como los grupos Brimca (Brasil, Rusia, India, México, China, Argentina y Países Árabes) o Civets (Colombia, Indonesia, Vietnam, Egipto, Turquía y Sudáfrica), a saber: la urbanización tiende a exacerbar la pobreza, el crecimiento de los cinturones de miseria y diversos problemas ambientales (contaminación de agua, pérdida de suelos, pérdida de la calidad del aire, concentración de sustancias peligrosas y ruido, entre otros), pero también ofrece una oportunidad de transformación positiva que puede coadyuvar en el cumplimiento de los actuales Objetivos de Desarrollo Sostenible y al crecimiento económico, aunque esto quede en entredicho después de la actualización de los otrora Objetivos de Desarrollo del Milenio (Díaz, 2012b; Díaz y León, 2012; Martine *et al.*, 2008; Sánchez-Rodríguez, 2008; Tacoli *et al.*, 2008; UNDesa, 2008; UnHabitat, 2018).

Esta idealización de ciudad ha causado que los asentamientos humanos, en economías con un rápido crecimiento por encima del promedio nacional y mundial, muestren tasas de incremento no vegetativo de población y del área construida en horizontal superiores a sus congéneres establecidos en las principales economías mundiales. Esta expansión, aunada al rezago y deterioro de la infraestructura

física, a las restricciones presupuestales y crisis financieras, a la pobreza en la que buena parte de su población vive y a la falta de gobierno, gobernabilidad y gobernanza en distintos niveles de toma de decisiones, entre otros elementos y condiciones urbanas, determina brechas sociales, exclusión, disparidad de oportunidades humanas e inequidad. Así mismo, genera un deterioro ambiental tanto dentro del sistema urbano como en los asentamientos humanos próximos y sistemas naturales adyacentes de soporte y provisión (Curtit, 2003; Díaz, 2011, p. 102; Martine *et al.*, 2008, p. 2; Sánchez-Rodríguez, 2008, p. 151).

Esta afectación obedece casi siempre a la disipación hacia las fronteras y el contorno de formas de materia y energía no aprovechables, como por ejemplo las basuras, las aguas servidas, los residuos peligrosos, las emisiones en la primera categoría y las radiaciones no ionizantes y el ruido en la segunda. Estos flujos de entrada, salida y recirculación constituyen perturbaciones en el interior, periferia, líneas de frontera y en el exterior de la ciudad que en algunos casos se logran pseudoestabilizar en condiciones muy alejadas del equilibrio, principalmente por las sucesivas reorganizaciones del sistema urbano con estructuras cada vez más complejas y hacia estas (García, 2006), pero en otras ocasiones pueden ocasionar un cambio de estado desfavorable para sus habitantes.

Como expresión de esta incansable operación de mantenimiento y lucha por la supervivencia —en un contexto de rápida producción del suelo urbanizado—, afloran gran variedad de problemas ambientales en las matrices agua, aire, suelo y biota, así como la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados, asociados con fenómenos naturales y antrópicos (Curtit, 2003, p. 17; Díaz, 2011, p. 29).

Esta forma de relación intramuros y con el entorno, que en la mayoría de los casos se construye de forma artificial, está indefectiblemente regida por los principios y leyes naturales, entre estas las correspondientes a la termodinámica. Por esta razón, es inevitable una variación y aumento de la entropía del sistema. Este incremento de “desorden” o de energía e información no útil, junto al crecimiento demográfico, a la presión sobre la infraestructura y capacidad instalada urbana, al consumo desmedido y al agotamiento de la oferta ambiental de las áreas productivas de soporte, puede provocar un

colapso parcial o total que se traducirá en “un drástico descenso en el tamaño de la población humana y/o en la complejidad política, económica y social durante un periodo de tiempo [sic] prolongado debido, entre otros aspectos, a un suicidio ecológico impremeditado” (Diamond, 2006, p. 23), tal como quizá ocurrió en antiguas civilizaciones como Harappa en el Valle del Indo (siglo XIV a. de C.); las ciudades estado mayas en la península de Yucatán (entre los siglos VIII y XI); Angkor, en la actual Camboya (siglo XV); Rapa Nui, en la isla de Pascua (siglo XVI) y Fatehpur Sikri, en India (siglo XVI), entre otras.

Ante el riesgo creciente de crisis e inestabilidad de las ciudades y asentamientos humanos, que afectan las dimensiones ambiental, económica, política, social, cultural y religiosa, surge la pregunta de investigación que se tratará de responder en este libro, a saber: *¿de qué manera la complejidad y los principios del metabolismo urbano y la termodinámica podrían contribuir a la identificación y potencial solución de los problemas ambientales de las ciudades capitales de Latinoamérica?*

En correspondencia con este cuestionamiento, la hipótesis que se establece provisionalmente como base de este trabajo es que, *con apoyo en los principios de conservación de la materia y la energía, como fundamentos del metabolismo urbano y la termodinámica y en el análisis del comportamiento de los sistemas amortiguados, se puede obtener un perfil metabólico y construir un funcional matemático como propuesta para coadyuvar en la identificación y potencial solución de los problemas ambientales de las capitales de América Latina.* Esta suposición tiene en cuenta las contribuciones de Ángel y Velásquez (2008), Ayeni (1976), Batty (1974), Brown y Ulgiati (1997), Díaz y Pullecio (2016), Fistola (2011), Illya Prigogine (1986, 1996, 1997, 2008), Leopold y Langbein (1962), Martínez (2015), Perolosso (2017), Stephanic *et al.* (2000) y Wilson (1970), entre otros ilustres académicos e investigadores. Sin embargo, al ser esta una propuesta arriesgada, se invita al lector a validarla a partir de su singularidad, modelos mentales, imaginarios y, naturalmente, a la luz de los hechos.

Por tanto, el trabajo de investigación que se presenta tuvo como objetivo general *elaborar una propuesta que permita obtener un perfil metabólico y construir un funcional matemático para coadyuvar en la identificación y solución de los problemas ambientales de las*

capitales de América Latina, con apoyo en los principios de conservación de la materia y la energía, como fundamentos del metabolismo urbano y la termodinámica y en el análisis del comportamiento de los sistemas amortiguados.

Para tal fin, fue necesario establecer varios objetivos específicos, siendo el primero *describir y comprender la ciudad como sistema complejo* a partir de los planteamientos de Acebillo (2012), Cacciari (2010), Díaz (2014), Díaz y Pulecio (2016), García (2006), Newman (1999), Moore (2007), Prigogine (2008), Reynoso (2010), Sáenz de Oíza (2006) y Swynghedouw (2006), entre otros autores. La *identificación de la estructura y funciones urbanas de retroalimentación y homeostasis que permiten a las ciudades capitales mantenerse en estados pseudoestables en condiciones muy alejadas del equilibrio* es el segundo objetivo específico, para lo cual fue necesario considerar los trabajos de Barnsley (2007), Bertalanffy (1994), Heavens, Ward y Mahowald (2013), Manrique (2016), Meadows, Meadows y Randers (1992); Roughgarden y Smith (1996), Smith y Corripio (2000), Sutton (1980) y Watson y Lovelock (1983) sobre el control y el amortiguamiento; así mismo, los planteamientos desde el punto de vista de la matemática diferencial de segundo orden de Swokowski (1989) y Zill (1997).

Exponer el grado de relación con las condiciones iniciales y de contorno y su alteración asociada a tal dependencia es el tercer objetivo, para lo cual fue necesario conocer la historia general y la dinámica actual de las ciudades objeto de estudio. El cuarto objetivo específico se estableció con el fin de *calcular y comparar su perfil metabólico agregado, histórico—en un intervalo de tiempo comprendido entre los años 2000 y 2015—y proyectado a 2025, en cada una de las ciudades establecidas*, para lo cual se consideraron los trabajos de Alfonso y Pardo (2014), Coronado (2015), Díaz (2011, 2013), Díaz *et al.* (2016), Delgado (2012, 2015), Giubrunet *et al.* (2016), Inostroza (2013), Jaramillo (2017), Serna *et al.* (2014), Luna (2015); Testa, Bertoni y Maffioni (2017) y Villalba (2016), sin olvidar, naturalmente, las fuentes institucionales y oficiales para cada ciudad. Así mismo, se han tenido en cuenta los más de veinticinco autores que han teorizado sobre el tema y que en algunos casos han desarrollado cálculos metabólicos, entre los que se cuentan principalmente Wolman (1965), Newman y Kenworthy (1999) y Hermanowitz y Azano (1999).

El quinto objetivo específico se concentró en *describir el cumplimiento de las leyes de la termodinámica en los sistemas capitalinos*, para lo cual fue necesario considerar la visión no atomista de Abbot y Van Ness (1975), Cengel y Boles (1994 y 2012) y Van Ness y Abott (1997); la atomista de Boltzman y Gibss desde la visión de Ben Naim (2011); y la aproximación desde la economía ecológica de Georgesco-Roegen (1971, 1979 y 1983) y Carpintero (2006). Finalmente, el último objetivo se estableció para obtener un *modelo matemático, tipo funcional, que permitiera exponer el comportamiento y la gestión de la entropía en las ciudades*

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo exigió una disertación conceptual preliminar sobre la ciencia clásica, la complejidad, el pensamiento complejo y las ciencias de la complejidad, con el fin de identificar el principal marco teórico para desarrollar los siguientes conceptos: 1) la teoría general de sistemas, 2) la dinámica de sistemas, 3) los sistemas amortiguados, 4) el metabolismo urbano, 5) la termodinámica y 6) las estructuras disipativas. También se buscaron puntos de asociación e isomorfismos en una ecología de saberes —en términos de Boaventura de Sousa Santos (2010)—, con el fin de validar que las leyes de la termodinámica rigen el devenir de los sistemas capitalinos y de alcanzar la convalidación de constructos matemáticos en el caso urbano.

Para este fin, la termodinámica clásica y del no equilibrio y la economía ecológica fueron las ciencias de la complejidad que viabilizaron la articulación entre la economía, las humanidades, las ciencias y la ingeniería, en cuanto al estudio de la sustentabilidad ambiental urbana se refiere. Así se logró la incorporación empírica y conceptual de los principios de conservación de la materia y la energía, la fisicoquímica, la física de los sistemas amortiguados y las estructuras disipativas en el contexto histórico y económico de la ciudad, para constituir un trabajo de integración interdisciplinaria que tuvo en cuenta las recomendaciones de Galway *et al.* (2016) y Repko y Szostak (2016) en el diseño y aplicación de conceptos inter- y transdisciplinarios. De esta manera se buscó explicar, en términos elementales, la homeostasis, los procesos de retroalimentación, el metabolismo urbano, la entropía y su disipación dentro de la ciudad y en su cono urbano regional.

Por tanto, el primer ejercicio tuvo por objeto definir la ciudad como sistema complejo, que al depender de las condiciones iniciales y el contorno, mereció la descripción breve de la historia en consideración a las respectivas poblaciones originarias y oriundas en la zona al momento de su fundación española y la posterior evolución durante la Colonia, la emancipación y vida libre, así como el análisis de su funcionamiento, organización y despliegue actual según las principales variables económicas en el contexto social existente. También se realizó una aproximación al modelo de crecimiento, al considerar que el devenir urbano se traduce, entre otras cosas, en la expansión horizontal o vertical, u horizontal y vertical, en virtud del espacio disponible y los sendos procesos de metropolización.

Así las cosas y considerando que la entropía es una propiedad extensiva —y por tanto, dependiente de la materia—, fue necesario presentar el perfil metabólico agregado de las principales ciudades capitales latinoamericanas (Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Ciudad de México, Lima y Santiago) para los años 2000, 2005, 2010, 2015 y en la actualidad, con proyección a 2025, para lo cual se realizó una rigurosa documentación de las cifras institucionales urbanas asociadas con los flujos de materia (agua, alimentos, bebidas, combustibles, basuras y gases de efecto invernadero), energía, población y producción, principalmente provenientes de institutos de estadística e informática de cada país, de las alcaldías, gobiernos y entidades urbanas y en casos excepcionales, de investigaciones provenientes de la academia o sectores industriales y de servicios.

Una vez evacuada la fundamentación teórica y conceptual para el estudio de la ciudad desde la complejidad (general y restringida) y expuestas las cifras del metabolismo social/urbano en función de consumo, se analizó la natural ineficiencia existente en los procesos de transformación de la materia y la energía y de la certeza de la entropía en los constructos del hombre. Para este propósito se efectuó una síntesis del estado ambiental —a partir de las cifras agregadas— de la cantidad de agua no contabilizada por pérdidas en conducción en tubería, de los vertimientos, del desperdicio de alimentos, de las basuras generadas y dispuestas en rellenos sanitarios o vertederos y de las emisiones de GEI.

Estas mermas, desperdicios, desgaste y disipación se gestionan en los sistemas urbanos capitalinos para lograr mantener o alcanzar su lugar protagónico en el modelo de crecimiento de su respectivo país o de la región, que junto con los flujos inicialmente útiles y dinamizadores de la economía, constituyeron las variables de un funcional matemático —soportado en la termodinámica clásica y de no equilibrio— que se construyó con el fin de exponer el cambio de magnitud y la potencial gestión de la entropía en las ciudades.

Una vez demostrada la utilidad teórica de estos conceptos y validado el uso y aplicación del metabolismo urbano, la entropía y la termodinámica como instrumentos técnicos y de política pública para identificar problemas ambientales urbanos, se realizó una disertación final sobre las posibilidades que tienen estos sistemas complejos para alcanzar las metas definidas por los Objetivos de Desarrollo Sostenible a partir de la propuesta de *Ciudades de Baja Entropía*, en la cual se expusieron algunas potenciales soluciones no ortodoxas al galimatías ambiental urbano regional.

En su estructura, el libro consta de cuatro capítulos. La obertura, denominada “La ciudad como sistema complejo: anomalía, pseudoeestabilidad y homeostasis urbana”, extensa y de detalle, describe a la ciudad como tal y advierte sobre las anomalías existentes y crecientes que están haciendo fallar muchos modelos, políticas y planes de sostenibilidad ambiental. Desarrolla además teórica y matemáticamente el concepto de *perturbación, retroalimentación negativa y homeostasis* desde la perspectiva de la mecánica newtoniana, el fenómeno del amortiguamiento y el cálculo diferencial, lo que permite representar y predecir la respuesta del sistema urbano al intercambiar agua, alimentos, combustibles fósiles, materiales de construcción, productos de consumo masivo, tecnología... con el entorno inmediato y las zonas de abasto y provisión y también comprender la forma como logran mantenerse en estados pseudoestables en condiciones muy alejadas del equilibrio ante la perturbación continua y creciente.

El segundo capítulo, “Metabolismo urbano y entropía en las principales ciudades capitales de Latinoamérica”, desarrolla sucintamente el devenir de Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Ciudad de México, Lima y Santiago desde su fundación, como el contexto dado por los

pobladores originarios y también por su dinámica, evolución y bifurcaciones a lo largo de grandes periodos, que pueden resumirse en cinco grandes transiciones, a saber: el mundo prehispánico, la Colonia, la República, la ciudad del siglo XX y la metrópoli extendida, durante los cuales se consolidaron como núcleos de concentración de capital, riqueza y paradójica pobreza y como nodos de conectividad local, regional y global.

En este capítulo se enfatiza que el logro alcanzado —como capitales de república o estado— ha exigido un ingente esfuerzo termodinámico para continuar siendo unas significativas economías regionales, y también un continuo y creciente flujo de materiales y formas de energía —en un contexto económico, social, político y natural diverso y cambiante— que progresivamente produce cantidades aún mayores de desorden, el cual se verifica como contaminación en las matrices aire, agua, suelo y biota. Esta realidad urbana se analiza desde el punto de vista de la economía ecológica, el metabolismo urbano y la entropía.

Así pues, se presenta un estudio comparativo del metabolismo urbano de estas ciudades para los años 2000, 2005, 2010, 2015 y en la actualidad, con proyección al 2025, en lo concerniente al consumo de agua, energía y alimentos, como entradas al sistema y la entropía generada en forma de vertimientos, emisiones y residuos sólidos. Este estudio regional latinoamericano demuestra que los centros urbanos en economías emergentes —de acuerdo con la diferencia cultural y geográfica— comparten una similitud metabólica que se verifica en un creciente consumo agregado y en un aumento de formas no útiles de materia y energía. Esta insostenibilidad urbano-regional se exacerba por las políticas neoliberales de crecimiento indefinido, según el espejismo de disponibilidad infinita de capital y el optimismo tecnocrático dominante.

El tercer acto de este texto considera los cambios de estructura, función y relación de los centros urbanos durante sus fases de crecimiento y mantenimiento. Por tal razón, al denominarse “Entropía en la ciudad, complejidad, gestión y disipación”, se ahonda en el estudio de la termodinámica clásica (no atomista) según la concepción de la ciudad como una gran máquina térmica compleja, poniendo énfasis

en la entropía como axioma de la segunda ley, para luego concretar propuestas matemáticas a partir de esta ciencia de la complejidad.

Esta aproximación, desde el punto de vista de la causa y efecto de los flujos de energía y los procesos reversibles en sistemas cerrados, permite transitar hacia la complejidad de los procesos irreversibles en sistemas abiertos en virtud de cuatro postulados termodinámicos, a saber: 1) que la entropía es una propiedad extensiva y que por tanto la entropía total de un sistema es igual a la suma de las entropías de los subsistemas; 2) que la generación total de entropía de un sistema va en aumento y que este es igual a los cambios de entropía ΔS en su interior y alrededores; 3) que los sistemas termodinámicos —como la ciudad y los alrededores— pueden hallarse circunscritos en una frontera considerablemente grande, por medio de la cual no hay una transferencia significativa de calor, trabajo o masa; y 4) que el cambio de entropía ΔS entre dos estados específicos de un sistema es el mismo, sin que importe la trayectoria —reversible o irreversible— que se siga en el proceso.

Una vez alcanzado este importante paso en la comprensión compleja de las ciudades, se presenta una propuesta matemática para dimensionar los principales elementos urbanos, su aporte de entropía en una ciudad y sus correspondientes factores para expresar —en unidades de kJ/K — la cantidad de energía no útil generada. El funcional obtenido se convierte en una propuesta innovadora para ahondar en el análisis termodinámico urbano, el cual se constituirá en una futura investigación.

Como final, “Ciudades de baja entropía” es el cuarto capítulo, en el cual se presentan recomendaciones para mejorar la homeostasis y adaptabilidad de los centros urbanos de economías emergentes y definir nuevos modelos de desarrollo urbano de baja generación de caos; además, para gestionar la entropía y promover flujos cíclicos de materiales y energía con una reducida afectación a los sistemas de abasto, provisión y alrededores. Estas iniciativas se fundamentan en el conocimiento y gestión del metabolismo urbano, en la posibilidad de relocalización del desorden generado y su potencial conversión en información útil. De igual manera, en el acatamiento de las leyes y principios naturales de parte de quienes toman las decisiones y de la ciudadanía en general.

Al proponerse la sostenibilidad ambiental urbana en función de la generación y gestión de entropía, se deja claro que el aseguramiento del sistema complejo y sus alrededores —para que puedan permanecer al servicio de generaciones futuras en condiciones apropiadas— dependerá de tres mecanismos de respuesta de la estructura urbana ante la continua perturbación asociada a los flujos de materia, energía, información y dinero, a saber: 1) la retroalimentación, 2) la homeostasis y 3) la disipación. Por tal motivo, este trabajo definitivamente se suma al esfuerzo mundial para que las ciudades coadyuven al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), principalmente al ODS 11.

Esta aproximación novedosa al estudio de la ciudad permitirá futuros trabajos de asociación de esquemas cognitivos, que superen la división disciplinar dominante en el gobierno urbano (economía, derecho, ciencias políticas, arquitectura e ingeniería). La gestión y relocalización del “desorden” urbano, la consolidación de comunidades de baja entropía, el diseño de depósitos de entropía urbana y regional y la compensación a comunidades receptoras que pagan el precio termodinámico de la existencia de las ciudades capitales, entre otros futuros trabajos de investigación, aumentarán la comprensión del mundo presente y los mundos posibles de este tipo de constructo humano, cuyo imperativo futuro será la supervivencia y el buen vivir.

Por último, se espera que el producto alcanzado —como insumo para el estudio y comprensión de la dinámica urbana y su sostenibilidad— atienda las palabras del poeta alemán Bertolt Brecht, citado por Ewen Frederic (2002, p. 45): “Si queremos aprovechar, en forma humana, nuestro conocimiento de la naturaleza, deberemos complementarlo con el conocimiento de la sociedad humana”.

1. La ciudad como sistema complejo: anomalía, pseudoestabilidad y homeostasis urbana

La percepción del mundo desde el pensamiento relacional y el reconocimiento de su dinámica no lineal en algunas invenciones humanas —como las ciudades y demás asentamientos humanos— exige una aproximación que propenda a la identificación, comprensión e intervención de las imbricadas estructuras urbanas en su interior y en el contorno metropolitano, en las cuales ocurren diversidad de fenómenos sociales, económicos, financieros, políticos, ambientales y fisicoquímicos.

Esta racionalidad compleja reconoce la difícil dicotomía entre la artificialidad del mundo del hombre y sus constructos —reflejada en una máquina viviente que lucha contra la obsolescencia y la degeneración en el tiempo— y la naturaleza, que expresa toda la rigurosidad de las leyes y principios de la creación y la vida.

1.1. La complejidad urbana y su anomalía

Ya sea como un sistema vivo (Díaz, 2014; Díaz y Pulecio, 2016), superorganismo urbano (Zhang, 2009a y 2009b), organismo cibernético (Swyngedouw, 2006), sistema complejo y dinámico (Newman, 1999), área metropolitana viviente (Moore, 2007), sistema insumo-producto (Adams, 2007), organismo en viva transformación (Sáenz de Oiza, 2006) o maravillosa máquina compleja (Agulles, 2017)¹, la ciudad es un sistema complejo (Reynoso, 2010) cuyo funcionamiento depende de diversos procesos fisicoquímicos en la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera y la biosfera, de la estructura y magnitud de los ciclos biogeoquímicos y de las interacciones con el contorno y los sistemas de abasto y provisión, que se verifican en flujos de materia, energía e información (M/E/I).

Así mismo, depende de la influencia de las fuerzas impulsoras y variables asociadas con la política, la economía, las finanzas, la religión y la cultura en las diversas funciones de relación —temporales y espaciales— entre los elementos y subconjuntos similares, disímiles, homogéneos y heterogéneos en el espacio urbano y periurbano. Los más representativos de estos son las organizaciones civiles, públicas y privadas, las comunidades de base, las etnias y los individuos. Cada

1 Juanma Agulles (2017) define la ciudad como un *Theatrum Machinarum*, un libro que describe la máquina real y en ciertas ocasiones una extrapolación fantástica de la máquina existente.

uno de estos tiene distintos imaginarios y múltiples universos de significación urbana, formas de actuar e intereses, razón por la cual la ciudad deja de ser única al expresar distintas prácticas y formas de vida urbana (Cacciari, 2010; Duhau y Giglia, 2008).

Por consiguiente, la *polis* griega y la *civitas*² romana se consolidan no solo desde una concepción filosófica, actuar político o posesión territorial, sino por la distribución de sus subsistemas e individualidades en el espacio-tiempo y por los diferentes gradientes térmicos, másicos y de *momentum* que emergen a causa del acomodamiento y comportamiento de sus elementos, sin que estas transferencias y posteriores reestructuraciones determinen equilibrios definitivos o una anulación sistemática de las diferencias y desigualdades. Es así como se verifica el bucle tetralógico orden/interacción/desorden/organización de Edgar Morin (1999), que a su vez corrobora la posibilidad de mantener ciertas estructuras ordenadas en condiciones muy alejadas del equilibrio.

Sin embargo, ante esta diversidad coexistente de elementos, conjuntos, fenómenos, formas de vida y mundos posibles, las ciudades han sido analizadas de manera fragmentada principalmente desde diversas áreas de conocimiento, considerando los distintos hechos políticos, económicos, financieros, sociales, ambientales y expresiones culturales como objetos de estudio aislados que después son validados, autenticados y codificados —desde un aparente actuar objetivo y absoluto— para generar datos científicos comunicables y útiles a los distintos grupos de interés que dependen del devenir urbano para subsistir, dominar, generar retornos financieros o políticos y alcanzar la felicidad u otro tipo de satisfactor. Esta supradivisión del complejo urbano fortalece la especialización de los trabajos científicos y profesionales, pero debilita cualquier proyecto diagnóstico, propositivo de intervención o predictivo desde la complejidad.

En mérito de lo anterior, podría decirse que el aumento en el número de datos generados, el dominio de los modelos econométricos y las deslumbrantes cifras que se muestran para los contextos urbanos

2 Massimo Cacciari (2010) esclarece la diferencia entre *polis* y *civitas*. La concepción griega se refiere a la sede, a la morada y al lugar donde tiene raíz la gente, mientras que la *civitas* romana es una ciudad donde concurren multiplicidades de religiones y etnias que concuerdan solo en el sometimiento a las mismas leyes.

han coadyuvado a la consolidación del paradigma de *ciudad infinita* (Burdett y Sudjic, 2011), que se materializa en forma de discursos, lineamientos de política, políticas públicas, planes de desarrollo, planes de expansión y mercado y, por supuesto, en proyectos de vida individual y comunitaria en la ciudad. Infortunadamente, todos estos terminan sucumbiendo ante las condiciones de no equilibrio que gobiernan el sistema complejo, evidenciando que los actos jurídicos, legislativos, ejecutivos y los planteamientos económicos no pueden regir lo ingobernable ya que las leyes de la naturaleza superan cualquier expectativa de regencia humana.

Planes y esquemas de ordenamiento territorial fallidos, políticas de gobierno incoherentes, discursos gubernativos huecos, programas y proyectos no ejecutados, presupuestos financieros sobre ejecutados, un ambiente contaminado, el descontento social y una infraestructura urbana deteriorada ajena al espacio público y al disfrute de la vida, entre otras, son evidencias de la no correspondencia entre las expectativas inducidas por los paradigmas tradicionales de gobierno urbano y el disfrute de la vida y el bien común.

Dichos fallos inquietan a la mayoría de las administraciones, no solo por la dificultad de predicción de las actuaciones políticas, de los resultados de proyectos formulados, ejecutados y finalizados, sino por la urgencia de convencer a los ciudadanos de que los persistentes fracasos en la resolución de problemas vigentes y emergentes son inherentes e inevitables en el gobierno urbano. Así, en estas situaciones surge el mesianismo de variopintos personajes provenientes de partidos políticos de derecha, centro democrático, izquierda o revolucionarios.

Si al galimatías urbano se le suman el crecimiento demográfico, la presión desmedida sobre las áreas de abasto y provisión, la saturación de la infraestructura y capacidad instalada y los cambios de magnitud en los ciclos biogeoquímicos, el riesgo de sufrir un descenso en el tamaño de la población humana o en la complejidad política, económica y social será enorme³, no solo por el suicidio ecológico

3 Jared Diamond es muy claro al advertir el colapso de ciudades y civilizaciones por causa de variables ambientales y sociales: Rapa Nui en la isla de Pascua, las ciudades estado mayas en la península de Yucatán, Harappa en el Valle del Indo y Angkor en la actual Camboya, entre otras, son muestra de ello.

impredictado que se induce (Diamond, 2006, p. 23), sino por la dificultad creciente de gestionar la entropía producida.

Esta realidad poco alentadora prevé días aciagos para estos leviantes de concreto, ladrillo y asfalto en economías emergentes, países en vías de desarrollo o pobres, lo que representa un reto para la investigación ambiental urbana desde la perspectiva termodinámica ya que la solución más acertada para afrontar la crisis ambiental está en poder gestionar la enorme cantidad de desorden generado en la pseudoestabilidad existente.

Influir en los procesos aleatorios que determinan los posibles estados futuros de este tipo de sistema complejo debe ser una prioridad del gobierno urbano, más aún si se desea que la autoorganización guíe la evolución hacia un nuevo orden más robusto, permitiendo un futuro viable para las instituciones, organizaciones, colectivos, familias e individuos.

1.2. Sistemas pseudoestables alejados del equilibrio

La multiplicidad de soluciones a las cuales se ve expuesto el devenir urbano da lugar a una serie de posibilidades que difícilmente pueden preverse, razón por la cual una ciudad adquiere la condición de estructura de no equilibrio, tipología que Illya Prigogine⁴ (1997, p. 49) convino en llamar estructuras disipativas.

Estos sistemas dinámicos y complejos, dominados por procesos irreversibles y regidos por las leyes y principios naturales, por lo general aumentan la producción de entropía por las continuas y crecientes perturbaciones generadas en su interior y las provenientes allende sus fronteras. Al amplificar sus fluctuaciones, mutan en función de las condiciones iniciales y del contorno, adquiriendo una historia con el transcurso y dirección privilegiada del tiempo (Prigogine, 1961 y 1986).

Entre el universo en la escala macro-, luego por el clima de la tierra a escala meso- y un fluido que experimente la inestabilidad de

4 El profesor Illya Prigogine fue galardonado en 1977 con el Premio Nobel de Química “por sus contribuciones a la Termodinámica del No Equilibrio y en especial, por la descripción de las estructuras disipativas” (Wagensberg, 1986, p. 154).

Bénard⁵ en la microescala, la ciudad es un caso palpable de un tipo de sistema cuyo estado estacionario de no equilibrio hacia el cual evoluciona —por sucesivas reorganizaciones— alcanza mayor complejidad que el estado de equilibrio inicial o correspondiente (García, 2006; Prigogine, 2008). Tal situación depende del funcionamiento de los subsistemas que la conforman, de la magnitud y tipología de los flujos de materia, energía, información y dinero que se intercambian en su interior y con el contorno y de la forma como las señales de perturbación son disipadas en los alrededores del sistema complejo o dentro de ellos. La *inestabilidad*, la *irreversibilidad* y las *perturbaciones/fluctuaciones* son conceptos que atienden la esencia de la complejidad urbana y son una excelente forma de aproximación a su comportamiento termodinámico (Acebillo, 2012b).

Por consiguiente, una gran interrogante de sostenibilidad ambiental para los centros urbanos en economías emergentes se centra en comprender y modelar las funciones, estructuras, niveles y subsistemas internos que les permiten mantener condiciones estacionarias globales o de estado pseudoestable⁶ bajo una dinámica de operación

5 La inestabilidad hidrodinámica consiste en la producción de una compleja organización espacial en un fluido, propiamente cuando el ΔT entre una lámina inferior a mayor temperatura que una superior alcanza un valor umbral, y convierte el estado estacionario en inestable, promoviendo así la convección (Prigogine, 1986).

6 Se dice que un sistema se encuentra en *estado estable* o en régimen permanente si los valores de las variables de proceso no sufren modificación alguna con el tiempo (Gooding, 1997, p. 89); cuando el flujo de masa y calor hacia adentro y afuera del sistema es constante (Kern, 1982, p. 26); y cuando las velocidades de cambio en el sistema pueden considerarse nulas sin error apreciable (Levenspiel, 1981, p. 20). Este estado se alcanza gracias a estructuras internas que actúan cuando se presenta alguna perturbación, o cuando —por alguna razón— el sistema no se encuentre en su estado inicial (Roughgarden, 1998, p. 126). En contraste, un sistema se encuentra en *estado transitorio* o *inestable* cuando alguna de las variables cambia su valor con el tiempo (Gooding, 1997, p. 89); cuando los flujos de calor o la temperatura, o ambos, varían con el tiempo en un punto fijo (Kern, 1982, p. 713); o cuando los productos que se forman se encuentran en lo máximo de la curva de energía (Levenspiel, 1981, p. 20). Así, se propone la *pseudoestabilidad* en el sistema complejo, puesto que, al ser abierto, solo en un momento dado infinitesimal los valores de las variables serían constantes, así como el flujo de materia, energía e información. La dinámica en la transferencia de la masa y el calor en el sistema complejo lo harían cambiar continuamente, es decir, se mantendría en un estado transitorio. En cuanto al *equilibrio*, la física lo define como el estado de un cuerpo cuando la suma de todas las fuerzas y momentos que actúan sobre él se contrarrestan (Verma, 1992); mientras que la química lo asocia a sistemas en los que se presentan reacciones opuestas con igual velocidad de ocurrencia, definiendo así una constante (K_e) que depende de la concentración de las sustancias químicas en el medio (Brown y LeMay y Bursten, 1993, p. 583). A partir de esta realidad, se podría decir que es una condición de estado en la cual un sistema se mantiene inmutable, sin cambio alguno. Para un sistema cerrado, esta discusión no tendría asidero ya

muy alejada del equilibrio termodinámico y también, en dilucidar la forma como se logra gestionar el nivel creciente de entropía asociado con la expansión urbana, la dinámica poblacional, las externalidades asociadas con el crecimiento económico y la transferencia de masa y calor, en un contexto político cambiante, de reducido alcance y cobertura temporal y un entorno cultural que oscila entre el arraigo a ultranza y el desprendimiento, la homogeneidad global y la búsqueda de identidad local.

Así las cosas, inicialmente se planteará una aproximación matemática para representar la capacidad de pseudoestabilización urbana mediante los conceptos de *homeostasis* y *amortiguamiento*; luego, en posteriores capítulos, se harán planteamientos⁷ desde la perspectiva termodinámica de los procesos irreversibles.

1.3. El amortiguamiento a partir de los constructos matemáticos

Toda estructura de no equilibrio o estructura disipativa contiene sistemas cibernéticos que actúan concomitantemente al ritmo de los flujos M/E/I, manifestando así una propiedad homeostática que le permite alcanzar estados pseudoestables durante un lapso determinado (Adams, 2007; Wiener, 1948). Por tal motivo, es viable y necesario analizar esta capacidad de sustentación y recuperación, cuando la materia, la energía y la información —útiles o no— fluyen, provocando una perturbación en el sistema.

De esta forma, se plantea una aproximación desde la mecánica newtoniana del fenómeno del amortiguamiento de una señal perturbadora, para representar y predecir la respuesta del sistema urbano al intercambiar agua, alimentos, combustibles fósiles, materiales de construcción, productos de consumo masivo, tecnología, etc., en su interior, con el contorno inmediato y las zonas de abasto y provisión.

que su representación en volúmenes de control sin flujos de energía, energía e información desde los alrededores y hacia los alrededores evidencia que solo percibe entornos inmediatos y en el que no se distinguen futuro y pasado (Maldonado, 2005, p. 23).

7 Al proponer que la transitoriedad de las señales de perturbación y las implicaciones de la respuesta del sistema urbano pueden modelarse a partir de la aproximación mecanicista y la complejidad, se facilitará la comprensión del estado actual y la proyección de supuestos futuros. Se consolida así como un modelo útil e instrumento para tomar decisiones técnicas, políticas y económicas.

A partir de este imperativo matemático, se puede enunciar el modelo de ordenador World 3 como uno de los desarrollos⁸ más representativos y vigentes —en términos conceptuales— que han incidido política, económica y socialmente en todo el mundo, cuyos resultados se describieron para el público en *Los límites del crecimiento* (1972), en su actualización *Más allá de los límites del crecimiento* (1992) y en el libro *2052: un pronóstico global para los próximos 40 años* (2012).

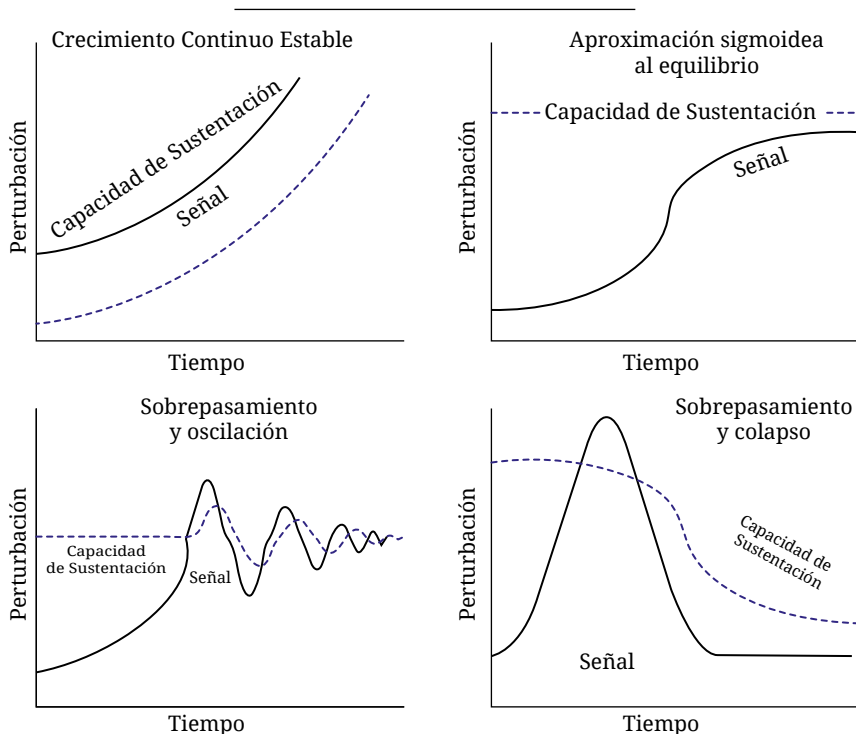
De este valioso trabajo, el concepto de *overshoot* o *sobrepaso*, que significa “ir más allá de los límites inadvertidamente, sin habérselo propuesto” (Meadows, Meadows y Randers, 1992, p. 29), permite relacionar los cambios de estado provocados por los flujos y las tradicionales fuerzas impulsoras sobre el sistema, y la forma de actuación de su estructura, homeostasis y retroalimentación ante la acción perturbadora. Este constructo mental, conceptual y matemático propone cuatro posibles respuestas del sistema y sus respectivas causas estructurales, a saber: 1) estabilidad con crecimiento continuo, 2) estabilidad con aproximación sigmoidea al equilibrio, 3) inestabilidad con sobrepaso y oscilación y 5) inestabilidad con sobrepaso y colapso (figura 1a).

Posterior a este desarrollo, el concepto de *retroalimentación* se presentó en el modelo Daisy World, que consideró al planeta Tierra como un superorganismo en el que la interacción de sus componentes bióticos y abióticos del ambiente mantienen las condiciones adecuadas para la existencia y continuidad de la vida (Lovelok, 1995b, citado por Barnsley, 2007, pp. 9 y 254; Watson y Lovelok, 1983). Esta propuesta matemática⁹, junto con la teoría Gaia, demostró que “la biota puede regular su ambiente abiótico sin recurrir a la planeación, a través [sic] de la combinación de mecanismos de retroalimentación positiva o negativa” (Barnsley, 2007, p. 252).

8 Modelo matemático/sistémico desarrollado por el Instituto Técnico de Massachusetts (1972) por encargo del Club de Roma.

9 La consideración del Daisy World fue así: un planeta imaginario plano, iluminado por un sol distante, con una atmósfera sin nubes y con una concentración imperceptible de gases efecto invernadero. Un sistema abierto con solo dos formas de vida: la negra y la blanca, definidas por el suelo en las cuales crecían. Aunque limitado en alcance, el modeló logró una representación matemática simple sobre la actuación que las distintas formas de vida pueden ejercer sobre su ambiente abiótico.

Figura 1a. Representación gráfica del concepto de “sobrepaso” (“overshoot”) según el Club de Roma



Fuente: elaboración propia con fundamento en la información de Meadows, Meadows y Randers, (1992).

En cuanto al aporte de la teoría general de sistemas (TGS) al modelado de la retroalimentación, Bertalanffy (1994) consideró el fenómeno dentro de “ciclos cerrados en lo que atañe a la materia y energía y abiertos con respecto a la información entrante” (p. 169). Esta percepción cibernética permitió desarrollar sistemas de control industrial, principalmente del proporcional integral derivativo (PID), que sentó las bases para explicar, desde la perspectiva de la ecología funcional, las regulaciones secundarias en el metabolismo de los organismos (Bertalanffy, 1994, p. 170).

Por su parte, los orígenes de la conceptualización matemática de la estabilidad ecológica y la subsecuente representación de los conceptos de *punto de equilibrio*, *estabilidad*, *estabilidad neutral* e *inestabilidad* —bajo series continuas y discretas de tiempo— se logró desarrollando y aplicando el modelo logístico de crecimiento o Ver-

hulst (ecuación 1a). Este constructo explica cómo un sistema, cuya población experimenta un rápido crecimiento, incrementa la presión sobre los recursos naturales como consecuencia de las necesidades de subsistencia. Este hecho provoca un agotamiento de las reservas y un posterior desabastecimiento (Gilbert *et al.*, 1981; Roughgarden y Smith, 1996) y este fenómeno de realimentación negativa ocasiona temporalmente un estado de equilibrio en la población, a causa de variaciones en las relaciones entre los individuos.

$$n(t) = e^{\lambda \cdot t} n(0) \quad \text{Ec. 1a}$$

Esta aproximación matemática logró demostrar, con apoyo en un modelo dinámico de población, que “si la razón de crecimiento exponencial es negativa, una pequeña desviación del equilibrio se contrae en el tiempo, definiendo un equilibrio estable [...], mientras que, si es positiva, una mínima variación crecerá en el tiempo y el equilibrio será inestable” (Roughgarden, 1998, p. 128). Esta afirmación corrobora la posibilidad de ocurrencia de la oscilación hacia el equilibrio, o del potencial colapso que puede sufrir un sistema abierto cuando se supera la capacidad de carga, que son posibilidades previstas por Meadows, Meadows y Randers desde 1972.

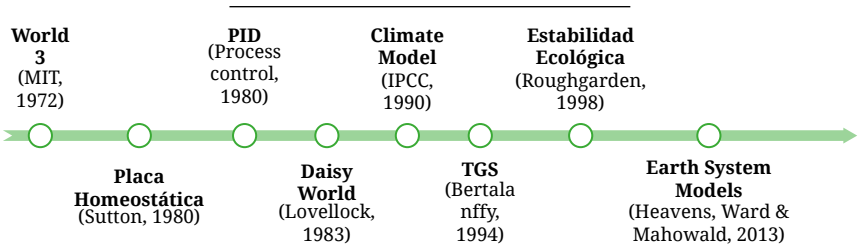
Nuevos desarrollos matemáticos mucho más robustos se han elaborado para proyectar el estado futuro del sistema planetario ante el crecimiento de emisiones de gases efecto invernadero, siendo el Mecanismo de Retroalimentación Radiactiva (Radiative Feedback Mechanisms) el más representativo del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (1990), con sus posteriores ajustes y versiones evidenciados en los Reportes de Evaluación AR3, AR4 y AR5 (por sus siglas en inglés).

Finalmente, el Modelo Integrado de Sistemas de la Tierra (Earth Systems Models ‘ESM’), elaborado por los departamentos de Ciencias de la Atmósfera y la Tierra de las universidades de Hampton y Cornell, es un excelente ejemplo de integración de varios modelos climáticos y de predicción meteorológica para la comprensión del sistema planetario y su afectación por la acción antrópica. Sin embargo, fracciona la dimensión ambiental, toda vez que simula las partes individuales del sistema climático y el intercambio de energía y masa entre la

atmósfera, el océano, la tierra y el hielo marino (Heavens, Ward y Mahowald, 2013), desconociendo, igualmente, las dimensiones social, económica, política y cultural¹⁰.

Después de revisar este breve antecedente, se puede concluir que las propuestas de constructos matemáticos —para conocer y explicar la retroalimentación y homeostasis de sistemas abiertos— han obedecido al interés de comprender la influencia de las condiciones iniciales y de los flujos de materia, energía e información en su historia y evolución y también, para estudiar las señales del presente, proyectar supuestos no deseados y anticiparse a eventos que excedan el valor de restitución de la estructura en un volumen de control establecido (García, 2006; Manrique, 2016), elaborados y analizados según la lógica de causa y efecto, los hechos y el método científico (figura 1b).

Figura 1b. Principales constructos matemáticos que explican la retroalimentación y la homeostasis en los sistemas naturales



Fuente: elaboración propia.

1.4. Pseudoestabilidad, retroalimentación y homeostasis

La TGS considera que “un sistema abierto puede alcanzar un estado final partiendo de diferentes condiciones iniciales y por diferentes caminos” (Bertalanffy, 1994, p. 42). Por tal motivo, cualquier punto de pseudoestabilidad que se alcance después del cambio de estado —en el que el cambio de entropía es mínimo— será producto de una estructuración interna y de la acción previa de los otrora servomecanismos que actuaron cuando se respondió a la perturbación. Este proceso de regulación está íntimamente relacionado con los conceptos de *equilibrio*, *retroalimentación*, *control*, *perturbación*, *homeostasis* y

10 Existe una diferencia entre lo social y lo cultural, ya que lo social compete a las dinámicas sociales y la cultura es la forma de pensamiento.

resiliencia (figura 1c), los cuales se analizarán desde el punto de vista del fenómeno del amortiguamiento y el cálculo diferencial.

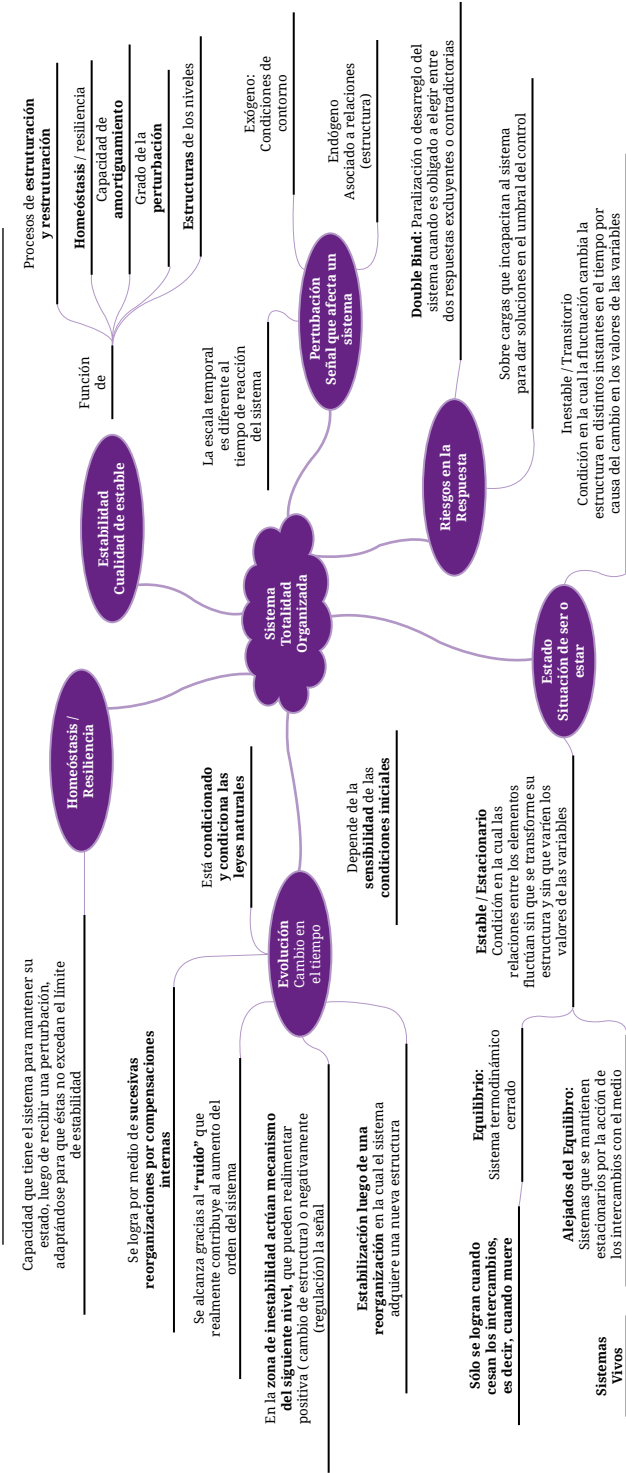
La primera aproximación a la realimentación puede realizarse según el actuar de los controladores lógicos programables (PLC, por sus siglas en inglés), que permiten actuar para corregir la desviación que puede llegar a presentarse entre un valor medido y el de referencia en un proceso automatizado, mediante la comprobación por instrumentos, el cálculo y la posterior actuación de válvulas sobre alguna línea de flujo de materia o energía. Tales lazos de control se activan ante una señal de perturbación en un sistema cerrado, “bajo el concepto de caja negra y un esquema unidireccional y lineal” (Smith y Corripio, 2000, p. 60).

Aunque esta realidad industrial dista del comportamiento de un sistema complejo (Bertalanffy, 1994, p. 169), la conceptualización de la retroalimentación positiva o negativa es extremadamente valiosa ya que evidencia la probabilidad de que se amplifique la perturbación inicial y genere un cambio de estado en el sistema, o que se contrarreste el efecto de la señal, manteniendo así un estado pseudoestable. Esta última situación abre las puertas al concepto de *homeostasis*¹¹, el cual se define como “el conjunto de funciones de autorregulación que conducen al mantenimiento de la constancia en la composición y propiedades del medio interno del organismo, al ser influidos por agente externos” (Barnsley, 2007, p. 32) (RAE, 2009).

Esta propiedad inherente a los sistemas abiertos la denomina David Sutton (1980, p. 36) *placa homeostática*, dentro de la cual se presenta la retroalimentación negativa. Pero si el sistema es vulnerable, presenta una dificultad estructural, una baja capacidad de adaptación dentro de los límites, o si la estructura interna favorece el cambio, aparece la retroalimentación positiva, que aleja al sistema de su punto de partida, pudiéndose convertir en un evento catastrófico

11 En muchas ocasiones la homeostasis se compara con el concepto de *resilience*, que se entiende como “la capacidad que tiene un cuerpo físico de recobrar su forma primitiva cuando cesa sobre él una presión” (Princeton, 2009, p. 4). Esta aproximación desde la estática y la dinámica físicas indudablemente es similar, pero no se refiere a los sistemas ni a los organismos, ni considera el conjunto de propiedades que los caracterizan. Por su parte, la *resiliencia* en el contexto psicosocial sí atiende a la comprensión de sistemas complejos, al entenderse como “el enfrentamiento efectivo que puede hacer un individuo ente eventos de vida estresantes, severos y acumulativos” (Kotliarenko y Dueñas, 1996, p. 3).

Figura 1c. Mapa mental de los conceptos de “estabilidad”, “homeostasis”, “evolución”, “estado” y “perturbación” en los sistemas complejos

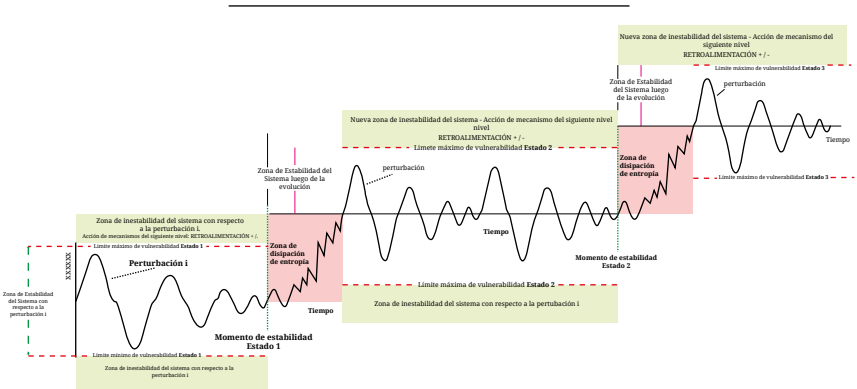


Fuente: elaboración propia.

para los elementos del conjunto y sus relaciones de interdependencia inicialmente establecidos.

Desde un punto de vista complejo, este trance se considera un proceso de estructuración y evolución hacia otro estado termodinámico producto de una acumulación de entropía (García, 2006) (figura 1d), que para el caso específico de una ciudad o asentamiento humano, se verificará como problemas ambientales¹².

Figura 1d. Representación gráfica de la estabilidad, perturbación y zona de no equilibrio para dos condiciones distintas: 1) oscilación dentro del límite de vulnerabilidad del sistema y 2) oscilación y superación del límite de vulnerabilidad del sistema^(a)



(a) Esta gráfica permite enunciar que la pseudoestabilidad de un sistema abierto se logra gracias a las funciones homeostáticas de relación entre los elementos que lo constituyen, que mantienen las propiedades que existen dentro de unos límites termodinámicos que definen la condición única de estado existente. De esta manera, se logran amortiguar las perturbaciones generadas en su interior y las provenientes del exterior. Sin embargo, si estas señales son demasiado fuertes o continuas, el sistema puede separarse demasiado de su condición inicial de manera que alcance —por reestructuración— nuevas propiedades en una condición de no equilibrio, que lo harían pasar a otro estado termodinámico.

Fuente: elaboración propia.

12 Algunos de estos son: 1) la pérdida de la calidad del aire; 2) la contaminación de los cuerpos de agua; 3) la degradación y desertización de suelos; 4) la liberación, bioacumulación y biomagnificación de compuestos orgánicos persistentes y metales pesados; 5) la pérdida de biodiversidad y 6) el incremento en el volumen de basuras, por citar los más importantes. Condición de estado que también se refleja en el deterioro de la infraestructura urbana, la congestión vehicular, el sobrepaso de los servicios básicos, la degradación e ineficacia de los servicios de salud y educación y el aumento de la inseguridad, entre otros aspectos.

1.5. Homeostasis, la ley de Hook y la segunda ley de Newton

Las perturbaciones a las que un sistema urbano está expuesto ya sean procedentes del entorno o como emergencia de la estructura interna, se perciben como variaciones en los flujos M/E/I que trastornan la estabilidad y generan cambios en las propiedades fisicoquímicas, en la estructura, niveles, funciones y ciclos biogeoquímicos en los subsistemas que lo conforman y en los individuos que los habitan. Esta tendencia al cambio se mantendrá, exacerbará o desaparecerá en el tiempo, dependiendo de las características del conjunto, la inercia y magnitud de la señal, la holgura de los límites, la actuación de la homeostasis y el tipo de retroalimentación.

Así las cosas y de manera preliminar, al concebir matemáticamente las perturbaciones y la respuesta del sistema según el fenómeno del amortiguamiento, se establecería un modelo de vibraciones de resorte “cuya solución representa el estado del sistema en un tiempo determinado [...] que para valores apropiados del tiempo t , los valores de la(s) variable (s) dependiente(s) describen el sistema en el pasado, el presente y en el futuro” (Zill, 1997, p. 12), constructo cuyas bases conceptuales son la ley de Hooke¹³, la segunda ley de Newton¹⁴ y el movimiento armónico simple (anexo 1). La primera define la fuerza restauradora de un resorte ($-ky$), que para el desarrollo de esta propuesta se consideraría como la retroalimentación negativa del sistema; la segunda ley de Newton —que se encarga de explicar y cuantificar el concepto de *fuerza*— se asimilará con la perturbación que afecta al sistema urbano; y por su parte, las fuerzas retardadoras corresponderían a la homeostasis, propiamente hablando (ecuación 1b).

13 Según la ley de Hook, la fuerza que se necesita para estirar un resorte a partir de su longitud natural es ky , para algún número natural real positivo k , que se llama constante de fuerza del resorte; por su parte, la fuerza restauradora del resorte es $-ky$ (Swokowski, 1989, p. 1012). El fenómeno consiste en una masa m sujeta al resorte, el cual se alargará en una magnitud dada, y alcanzará la posición de equilibrio en la cual su peso W se equilibra con la fuerza de restitución, siendo el peso una relación de masa por aceleración de la gravedad.

14 Esta ley afirma que la acción neta aplicada sobre un cuerpo es proporcional a la aceleración que este adquiere, siendo la constante de proporcionalidad la masa del cuerpo.

$$\text{Respuesta del sistema} = f(\text{homeóstasis; perturbación; retroalimentación})$$
$$\text{Respuesta} = f(H_m; P_t; R_{tro}) \qquad \text{Ec. 1b}$$

- Donde: H_m : Homeostasis
 P_t : Perturbación
 R_{tro} : Retroalimentación (positiva o negativa)
- Si: $P_t > H_m$, entonces hay posibilidad de cambio de estado
 $P_t < H_m$, entonces se mantiene el estado pseudoestable
- R_{tro} es (+), entonces existe la posibilidad de cambio de estado
- R_{tro} es (–), entonces hay posibilidad de mantener el estado pseudoestable

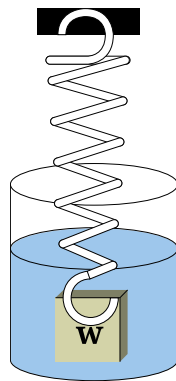
Relación:

Relación perturbación y homeostasis	Retroalimentación	
	Rtro (+)	Rtro (–)
$P_t > H_m$	Cambio de estado y posibilidad de colapso	Oscilación y posible cambio de estado
$P_t < H_m$	Oscilación en estado pseudoestable	Oscilación en estado pseudoestable

Fuente: elaboración propia.

Así, la homeostasis se puede representar de acuerdo con el fenómeno del amortiguamiento como una fuerza retardadora sobre una masa en movimiento, que se define en dirección opuesta a este y cuya magnitud es proporcional a una potencia de la velocidad instantánea de la masa (figura 1e). Por tanto, la fuerza retardadora (homeostasis) que interviene está dada por $-c(dy/dt)$, para una constante de amortiguación positiva c (Showkowski, 1989, p. 1014; Zill, 1997, p. 216).

Figura 1e. Sistema masa-resorte-amortiguamiento



cuando existe un fuerza de amortiguamiento (o de fricción), "se define su dirección opuesta a la del movimiento y que su magnitud es directamente proporcional a la velocidad del cuerpo... por lo tanto la fuerza de amortiguamiento está por $-c(dy/dt)$ para una constante positiva C " (Showkowki, 1989, 1014).

Ley	Elemento	Fuerza	Símil	Símbolo
Ley de Hook	$-ky$	Restauradora del resorte	Capacidad de retroalimentación	R_{tro}
Ley de Newton	$m(d^2y/dt^2)$	Acción sobre el sistema	Perturbación asociada a los flujos M/E/I	P_t
Amorti-guamiento	$c(dy/dt)$	Fuerza retardadora	Homeostasis	H_m

Fuente: elaboración propia con información de Swokowski (1989) y Zill (1998).

Por tanto y de acuerdo con la segunda ley de Newton, la ecuación diferencial que describiría el comportamiento es:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -ky - c \frac{dy}{dt} \tag{Ec. 1c}$$

Donde $m(d^2y/dt^2)$ correspondería a la fuerza que provoca el desplazamiento dentro de los límites máximo y mínimo, es decir, la perturbación que afecta el sistema; $-ky$ equivale a la capacidad de retroalimentación negativa y $c(dy/dt)$, como fuerza retardadora, representaría la *homeostasis* del sistema.

Procedimentalmente, si se divide toda la ecuación por la masa m , con el posterior ordenamiento de los términos de la expresión matemática se obtiene la ecuación diferencial para una vibración amortiguada:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} y = 0 \quad \text{Ec. 1d}$$

Cuya solución general, según el teorema de Euler, es:

$$y = e^{-pt} (C_1 e^{\sqrt{p^2 - \omega^2} t} + C_2 e^{-\sqrt{p^2 - \omega^2} t})$$

Ecuación general que puede simplificarse dependiendo de la forma como el sistema responda a la perturbación: 1) de manera sobreamortiguada, 2) amortiguada críticamente, o 3) subamortiguada. Esto es, en términos matemáticos, en función de las posibles raíces correspondientes a los tres tipos de movimiento del cuerpo (ecuaciones 1e, 1f y 1g).

$$\text{Sobreamortiguamiento:} \quad p^2 - \omega^2 > 0 \quad \text{Ec. 1e}$$

$$\text{Amortiguamiento crítico:} \quad p^2 - \omega^2 = 0 \quad \text{Ec. 1f}$$

$$\text{Subamortiguamiento:} \quad p^2 - \omega^2 < 0 \quad \text{Ec. 1g}$$

$$\text{Donde: } p^2 - \omega^2 = \frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m} = \frac{c^2 - 4mk}{4m^2} \quad \text{Ec. 1h}$$

Es decir, las posibles soluciones a la ecuación (raíces) relacionan la constante de restitución del resorte (k), la masa (m) y la constante del medio amortiguador (c), que para el caso de un sistema abierto correspondería a la retroalimentación negativa, la cantidad de masa involucrada y la homeostasis existente, respectivamente.

1.6. El amortiguamiento y la homeostasis

Considerando que, desde la matemática de las ecuaciones diferenciales de segundo orden y el modelo del movimiento amortiguado, la homeostasis puede ser sobreamortiguada, críticamente amortiguada o subamortiguada, a continuación se representará el tipo de respuesta ante una perturbación/vibración asociada con un flujo M/E/I, en función de las posibles raíces matemáticas expuestas en las ecuaciones 1e a 1g (tabla 1a).

Tabla 1a. Tipo de amortiguamiento en función de las raíces posibles para una vibración amortiguada y su comparación con la condición homeostática y la retroalimentación negativa

Tipo de amortiguamiento	Raíz posible (símil con el fenómeno de amortiguamiento)	Condición homeostática y retroalimentación negativa
Sobreamortiguamiento	$\frac{c^2 - 4mk}{4m^4}$	> 0 $H_m - R_{tro} > 0$
Amortiguamiento crítico		$= 0$ $H_m - R_{tro} = 0$
Subamortiguamiento		< 0 $H_m - R_{tro} < 0$

Fuente: elaboración propia.

Una respuesta *sobreamortiguada* corresponde al supuesto en el que la estructura del sistema exhibe una *elevada homeostasis* (constante c del medio amortiguador) que no es comparable numéricamente con el valor de la retroalimentación negativa (constante k de restitución del resorte). Matemáticamente esto se refleja en que $c^2 > 4mk$, lo que significa que la perturbación se lleva a cero sin oscilación alguna (figura 1f), permitiendo que el sistema alcance la condición inicial en un corto periodo.

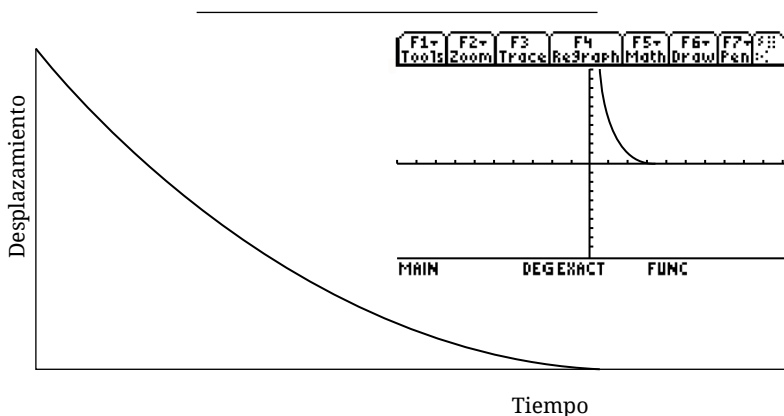
Este comportamiento de rápido ajuste obedecería a una respuesta robusta dentro de los límites homeostáticos (c) en un sistema con poca masa (m), o una perturbación cuya señal tenga una magnitud baja que no logra afectar considerablemente al sistema. Ejemplo de este comportamiento, para la segunda condición, es un sistema complejo en condiciones prístinas mínimamente influido por las condiciones de frontera o de contorno.

Por su parte, el *amortiguamiento crítico* se considera, en este símil, como una homeostasis (constante c del medio amortiguador) complementada con el mismo valor de la retroalimentación negativa del sistema (constante k de restitución del resorte), lo que determinaría una anulación casi inmediata de la perturbación en una condición límite en la que las raíces de la solución matemática equivalen a cero ($p^2 - \omega^2 = 0$), quedando la siguiente ecuación simplificada:

$$y = e^{-pt}(C_1 + C_2t)$$

Ec. 1i

Figura 1f. Solución gráfica de un sistema perturbado que exhibe una homeostasis significativa. Sistema sobreamortiguado



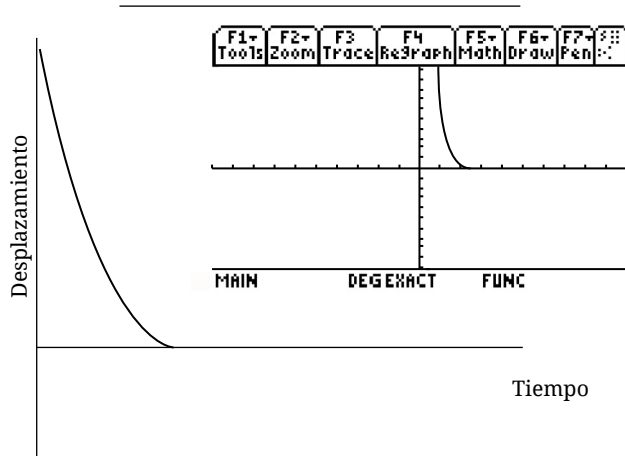
Fuente: elaboración propia con información y gráfico generados del modelado matemático de la ecuación 3 con el *software* de la calculadora TI-98.

Esta condición exhibe dos fuerzas que sopesan de igual manera la respuesta para llevar al sistema a su estado estacionario en un inmediato momento (figura 1g), lo que exigiría un gran gasto energético en las funciones de relación en el sistema (gran rozamiento interno), con un subsecuente incremento del desorden. Es decir, un sistema urbano con una superestructura de regulación de flujos de materia, energía e información.

No obstante, la situación límite de la diferencia entre los valores de la homeostasis (constante c del medio amortiguador) y de la retroalimentación negativa (constante k de restitución del resorte) pone en evidencia que “una disminución en la fuerza de amortiguamiento, por pequeña que sea, lleva a un movimiento oscilatorio” (Swokowski, 1989, p. 1015), hecho que da lugar a la condición más común en la respuesta a una perturbación: el *subamortiguamiento*.

Esta respuesta considera un actuar progresivo de la homeostasis (fuerza de amortiguamiento) en un supuesto en que la retroalimentación negativa (restitución del sistema) tiene mayor valor numérico. Esta sinergia logra disipar la perturbación mediante una oscilación de la señal en el tiempo, llevándola a cero de una manera progresiva (figura 1h). Esta condición define raíces complejas conjugadas, cuya solución general es:

Figura 1g. Solución gráfica de un sistema perturbado que exhibe una homeostasis complementada con una fuerte retroalimentación negativa. Sistema críticamente amortiguado



Fuente: elaboración propia con información y gráfico generados del modelado matemático de la ecuación 3, con el *software* de la calculadora TI-98.

$$y = e^{-pt}(C_1 \cos t\sqrt{\omega^2 - p^2} + C_2 \sin t\sqrt{\omega^2 - p^2}) \quad \text{Ec. 1j}$$

Donde: p : homeostasis del sistema en relación con la cantidad de materia: $H_m/2m$
 p^2 : Homeostasis del sistema en relación con la cantidad de materia: $H^2_m/4m^2$
 ω^2 : Retroalimentación negativa en relación con la cantidad de materia: $4mR_{tro}/4m^2$

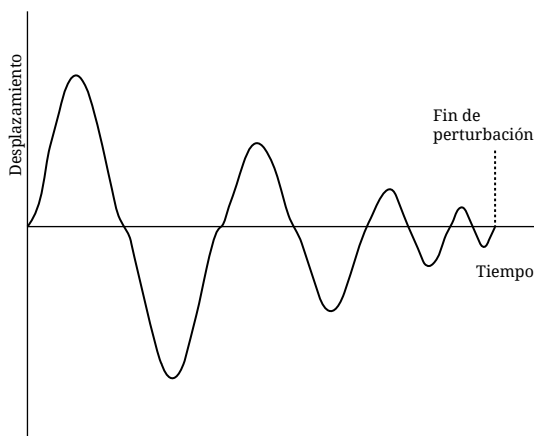
C_1 : Constante 1 dependiente de la estructura del sistema

C_2 : Constante 2 dependiente de la estructura del sistema

t : Tiempo

En este supuesto, la perturbación se mantiene por un determinado intervalo, oscilando sin que el sistema cambie de estado aparente. Su amplitud y permanencia en el tiempo dependen del tipo y magnitud del flujo, de la capacidad de retroalimentación negativa del sistema y de la homeostasis.

Figura 1h. Solución gráfica de un sistema perturbado que exhibe una homeostasis reducida



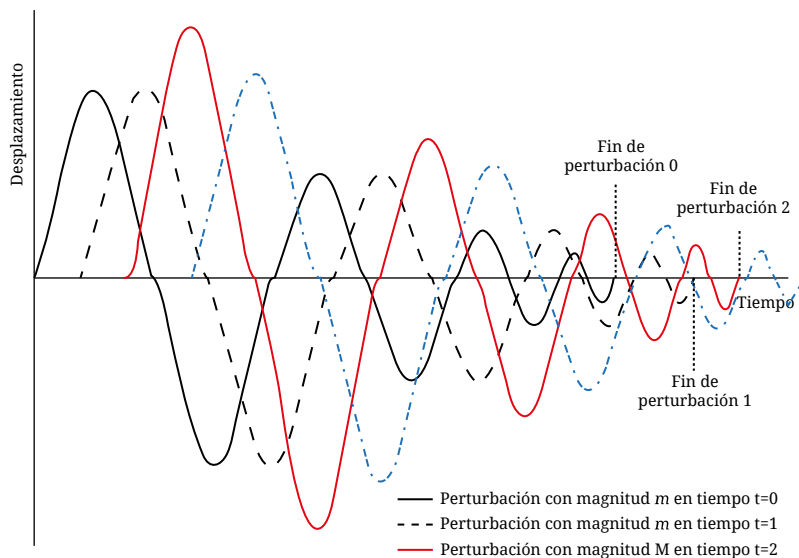
Fuente: elaboración propia con información y gráfico generados del modelado matemático de la ecuación 3, con el *software* de la calculadora TI-98.

Es menester advertir que las anteriores representaciones gráficas tienen la condición ideal de un sistema que es perturbado en una sola ocasión, al que se le da la oportunidad de responder con la retroalimentación (fuerza de restitución) y la homeostasis (amortiguamiento) en un momento dado, y se le otorga el tiempo necesario para la pseudoestabilización. Sin embargo, los sistemas abiertos de manera continua reciben señales que deben reducirse en el menor tiempo posible, acción funcional que inevitablemente causará un deterioro estructural y de sus respectivos subsistemas (figura 1i) y así mismo, un consumo energético continuo, un desgaste de la máquina térmica urbana y un cambio en las condiciones de frontera a causa de la disipación del desorden hacia el contorno, lo que aumenta la probabilidad de un cambio de estado.

Este evento lo considera Ilya Prigogine (1996 y 2008) como una bifurcación irreversible que brinda un carácter histórico al sistema, cuyo caos espacio-temporal llevaría a fenómenos de potencial orden en sistemas hidrodinámicos¹⁵, climáticos, espaciales gravitacionales y

15 El premio Nobel de Química ejemplifica esta autoorganización desde la Inestabilidad de Bénard (1992, p. 161), debida a un gradiente vertical de temperatura establecido en una capa horizontal de líquido.

Figura 1i. Representación del sistema perturbado de forma continua (nótese que con dificultad llegará al punto de estabilidad o equilibrio)^(a)



^(a) Este fenómeno presenta agravantes asociados con el excesivo consumo energético y la generación de entropía, situación paradójica enunciada por Brown, LeMay y Bursten (1993), sobre el incremento del desorden cuando se actúa para contrarrestarlo.

Fuente: elaboración propia.

neuronales, entre otros. Cosa contraria a lo que puede ocurrir en una ciudad o asentamiento humano cuando lo afecta la acción natural y antrópica en un contexto político, económico, cultural, religioso y fisicoquímico: sucumbir ante la perturbación y posterior bifurcación que se presente, a causa del colapso total o parcial de subsistemas con baja homeostasis y adaptabilidad y por la formación de nuevas estructuras de no equilibrio que exacerben el consumo de masa y otras formas de energía e información.

De igual manera, se incrementaría el nivel de entropía y su disipación con el entorno, lo cual afectaría los sistemas de abasto y provisión (zonas agrícolas, ecosistemas estratégicos, áreas protegidas, depósitos y reservorios), hasta el punto de reducir en cantidad y calidad el flujo y suministro de agua, alimentos, aire puro, materiales... En este último caso, la ciudad se ahogaría, apagándose hacia una muerte térmica (Diamond, 2006; Díaz, 2014).

Por último, es importante advertir que la homeostasis (amortiguamiento) y la retroalimentación negativa (restitución) no necesariamente garantizan el mantenimiento del estado estable o estacionario de un sistema abierto y complejo como la ciudad ya que puede ocurrir una perturbación extrema puntual o continua (asociada a fenómenos naturales, conflictos armados, pandemias o catástrofes inducidas por el hombre) cuya magnitud afecte toda la estructura, provocando un colapso parcial o total urbano, o peor aún, su destrucción¹⁶.

1.7. Operación del planteamiento matemático

En los sistemas urbanos continuamente se presentan flujos M/E/I desde su interior, hacia su interior y en su interior que los separan de forma ininterrumpida del punto de equilibrio y estabilidad, con el riesgo de desgastar la homeostasis, presentar una retroalimentación positiva y sobrepasar los límites, lo que provoca un cambio para el cual no necesariamente se encuentran preparados.

Al considerar este fenómeno operativamente, se puede afirmar que una ciudad tiene mecanismos emergentes e internos que logran restaurar el estado inicial después de ser afectada por la contaminación y los flujos continuos M/E/I, siempre y cuando existan las propiedades de retroalimentación negativa, definida por una constante de restitución (k) en proporción a la masa interna (m) y la homeostasis, semejante a la constante del medio amortiguador (c), que dependerá de su estructura y organización. Así pues, es conveniente enunciar los principales elementos, subsistemas y estructuras urbanas que influyen en el amortiguamiento y la restitución, así como las formas más comunes y de mayor magnitud de perturbación.

Para efectos de este planteamiento matemático, se puede decir que una ciudad es *homeostática* si y solo si cuanta con una estructura física, económica, política, institucional, fisicoquímica, biótica y natural que le brinde la capacidad de gestionar y convertir parcial-

16 A manera de ejemplo tenemos: Nueva Orleans con el huracán Katrina (2005); Alepo, con el conflicto interno sirio (2016), y Chernóbil, al presentarse el accidente nuclear de la planta Vladimir Llich Lenin (1986).

mente las distintas formas de materia, energía, información, dinero y talento humano en información útil, riqueza y bienestar, gracias a distintos procesos de transformación en su interior; además, si tiene la capacidad de disipar la entropía que se genera.

Para tal fin, debe contar con los sistemas básicos de infraestructura de servicios públicos (agua, energía, gas, recolección de basuras y alcantarillado), vivienda digna, vías de acceso, desplazamiento y comunicación con velocidades de flujo acordes con su función; sistemas de transporte público, privado y compartido; sistemas de producción, abasto, provisión y distribución de alimentos en su interior y alrededores. También, gozar de total cobertura de servicios de salud, educación y de esparcimiento/ocio; una organización político-administrativa para el gobierno público, la participación comunitaria y del sector privado y unos poderes ejecutivo, legislativo y judicial equilibrados, entre otros aspectos.

De igual forma, debe tener estructuras para el flujo eficiente y eficaz de la información, tanto análoga como digital, soportado por canales físicos, tecnologías de información y comunicación, el *Big Data*, la Nube y el Internet de las Cosas. También, disponer de áreas verdes de amortiguamiento, conservación urbana y reservas naturales colindantes; e infraestructura para la prevención, la mitigación, el control y la compensación de la contaminación. Todo esto en un contexto cultural, religioso, político, científico y económico sano, tanto en su interior como en los sistemas aledaños y supersistemas que lo contienen (v. g. departamentos, provincias, estados o países) (tabla 1b, ecuación 1k).

$$H_m = f(\text{Infra}; \text{Sist}; \text{Serv}; \text{Org}; \text{Poder}; \text{Info}; \text{Área}) \quad \text{Ec. 1k}$$

Donde:

$$\text{Infra} = f(S_{\text{vicios}}; V_{\text{enda}}; V_{\text{ias}}; \text{PMCC}_{\text{cont}})$$

$$\text{Sist} = f(T_{\text{porte}}; \text{PAD}_{\text{food}})$$

$$\text{Serv} = f(S_{\text{salud}}; S_{\text{educa}}; S_{\text{ocio}})$$

$$\text{Org} = f(G_{\text{urban}}; \text{Sec}_{\text{priv}}; \text{Com}_{\text{unidad}})$$

Tabla 1b. Descripción de los principales elementos que —en estructura— consolidan la homeostasis como propiedad emergente de una ciudad

Conjunto de elementos	Elemento	Símbolo
Infraestructura (Infra)	Servicios públicos	S _{vicios}
	Vivienda	V _{enda}
	Vías	V _{ias}
	Prevención, mitigación, control y compensación de la contaminación	PMCC _{cont}
Sistemas (Sist)	Transporte	T _{porte}
	Producción, abasto y distribución de alimentos	PAD _{food}
Servicios (Serv)	Salud	S _{salud}
	Educación	S _{educa}
	Esparcimiento	S _{ocio}
Organización (Org)	Gobierno	G _{urban}
	Sector privado	Sec _{priv}
	Comunidades	Com _{unidad}
Poderes (Poder)	Ejecutivo	P _{eje}
	Legislativo	P _{leg}
	Judicial	P _{jud}
Información (Info)	Información digital	Info _{dig}
	Información análoga	Info _{analog}
Áreas (Area)	Verdes	A _{green}
	Zonas de conservación urbana	Z _{consv}
	Naturales	A _{nat}

Fuente: elaboración propia.

$$\begin{aligned} \text{Poder} &= f(P_{\text{eje}}; P_{\text{leg}}; P_{\text{jud}}) \\ \text{Info} &= f(\text{Info}_{\text{dig}}; \text{Info}_{\text{analog}}) \\ \text{Area} &= f(A_{\text{green}}; A_{\text{nat}}; Z_{\text{consv}}) \end{aligned}$$

En cuanto a la *retroalimentación* del sistema se refiere, esta depende principalmente de todas las políticas públicas, estrategias e instrumentos con que cuenta la administración del sistema urbano. Estos últimos son de naturaleza organizativa (estructuras de gestión, coordinación y cooperación), metodológica (planes y programas), financiera (rentas, subsidios, impuestos, donaciones), de mejora del conocimiento, de comunicación y normativa (leyes, resoluciones, decretos, etc.), establecidos para el correcto gobierno urbano y como respuesta ante la variación en la condición de estado ideal.

De igual forma, en la retroalimentación también deben considerarse todas las fuerzas impulsoras que confluyen en el sistema, como son el mercado y los intereses económicos, las políticas públicas de Estado y los acuerdos internacionales; también, los movimientos sociales y políticos, las tendencias culturales y religiosas y el actuar de la naturaleza. Algunos son favorables para reducir la perturbación (retroalimentación negativa) o para exacerbarla (retroalimentación positiva) (tabla 1c, ecuación 11).

$$R_{\text{tro}} = f(\text{FIMP}; \text{RTA}) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$$\text{FIMP} = f(\text{FIMP}_{\text{econo}}; \text{FIMP}_{\text{polit}}; \text{FIMP}_{\text{cult}}; \text{FIMP}_{\text{relig}}; \text{FIMP}_{\text{fq}}; \text{FIMP}_{\text{nat}})$$

$$\text{RTA} = f(\text{RTA}_{\text{pp}}; \text{RTA}_{\text{est}}; \text{RTA}_{\text{inst}})$$

Por último, la *perturbación*, como se ha mencionado a lo largo de los apartados anteriores, se relaciona sobre todo con las formas de materia y energía que fluyen desde la ciudad, hacia esta y dentro de ella, y son las más relevantes por magnitud, identidad cultural, prioridad económica y estrategia geopolítica las siguientes: el agua (abastecimiento, distribución y pérdidas), la energía eléctrica, los combustibles fósiles (gas natural, gasolina, *fuel oil*, carbón, gas licua-

Tabla 1c. Descripción de los principales elementos que se consideran en la retroalimentación del sistema ante una perturbación

Conjunto de elementos	Elemento	Símbolo
Fuerza impulsora (FIMP)	Económica	FIMP_{econo}
	Política	FIMP_{polt}
	Cultural	FIMP_{cult}
	Religiosa	FIMP_{relig}
	Fisicoquímica	FIMP_{fq}
	Natural	FIMP_{nat}
Respuesta (RTA)	Política pública	RTA_{pp}
	Estrategias	RTA_{est}
	Instrumentos	RTA_{inst}

Fuente: elaboración propia.

do de petróleo) y los alimentos y bebidas (azucaradas, alcohólicas y agua en botella). También cuentan las corrientes contaminantes que se generan (vertimientos, emisiones y residuos sólidos) (tabla 1d, ecuación 1m).

$$P_t = f(\text{Masa}; \text{Información}; \text{Dinero}; \text{Población}) \qquad \text{Ec. 1m}$$

Donde:

$$\text{Masa} \in \left(\begin{array}{l} \text{agua, energía eléctrica, combustibles fósiles,} \\ \text{alimentos, bebidas, corrientes contaminantes} \end{array} \right) \qquad \text{Ec. 1n}$$

Al finalizar este ejercicio matemático, se puede decir que la repetitiva tendencia cíclica urbana de alejarse del equilibrio y de mantenerse en una condición de estado pseudoestable debe ser parte del análisis de los procesos y las consecuencias de la transformación urbana, siendo “conceptos claves en los estudios de metabolismo urbano” (Acebillo, 2012a, p. 43). Por tal motivo, el actuar de la homeostasis y la retroalimentación, así como la magnitud de la perturbación, se puede dimensionar desde la cuantificación de los flujos de materiales y energía en contexto histórico, social, económico, político y cultural en el devenir de la ciudad o asentamiento humano. Por consiguiente,

este estudio de *metabolismo urbano* se desarrollará para cinco principales ciudades capitales de habla hispana en América Latina en el siguiente capítulo, a saber: Buenos Aires Ciudad, Bogotá, Ciudad de México, Lima y Santiago de Chile.

Tabla 1d. Descripción de los principales elementos que se consideran en la perturbación que afecta a una ciudad

Forma	Elemento	Subcomponente
Masa (m)	Agua	Abastecimiento
		Conducción
	Energía eléctrica	N. A.
	Combustibles fósiles	Gas natural
		Gas licuado de petróleo
		Gasolina
		<i>Fuel oil</i>
		Carbón
		Madera y lignocelulósicos
	Alimentos	N. A.
	Bebidas	Azucaradas
		Alcohólicas
		Agua en botella
	Corrientes contaminantes	Vertimientos
		Emisiones
		Residuos sólidos
Información	N. A.	N. A.
Dinero	N. A.	N. A.
Población	N. A.	N. A.

Fuente: elaboración propia.

2. Metabolismo urbano y entropía en las principales ciudades capitales de Latinoamérica

Como sistemas complejos, las ciudades capitales en Latinoamérica han vivido una aventura urbana definida por las condiciones iniciales de su fundación y el contexto dado por los pobladores originarios. Así mismo, por su dinámica, evolución y bifurcaciones a lo largo de grandes periodos¹⁷, que pueden resumirse en cinco transiciones, a saber: época prehispánica, la Colonia, la República, la ciudad del siglo XX y la metrópoli extendida, proceso de consolidación como núcleos de concentración de capital, riqueza y paradójica pobreza, como nodos de conectividad local, regional y global y como lugares de oportunidad, impredecibilidad y riesgo (Duhau y Giglia, 2008).

Este logro ha exigido un ingente esfuerzo termodinámico para mantener estados pseudoestables en condiciones alejadas del equilibrio y además un continuo y creciente flujo de materiales y formas de energía —en un contexto económico, social, político, natural, diverso y cambiante— que de forma progresiva produce cantidades aún mayores no utilizables, las cuales se manifiestan como contaminación en las matrices aire, agua, suelo y biota. Esta realidad urbana puede representarse mediante la economía ecológica, a partir del concepto del *metabolismo urbano* y la *entropía*.

Por tanto, el capítulo presenta un estudio comparativo del metabolismo urbano entre las ciudades de Bogotá, Lima, Ciudad de México, Santiago de Chile y Buenos Aires Ciudad (escogidas según los criterios expuestos en la tabla 2a) para los años 2000, 2010, 2015 y en la actualidad, con proyección a 2025 a partir de las cifras más vigentes¹⁸, en lo concerniente al consumo de agua, energía, combustibles, alimentos y bebidas y la generación de vertimientos, emisiones y residuos sólidos.

17 Conviene señalar que cada ciudad se encontró inmersa en sendos contextos políticos singulares durante la República, representados principalmente por las pugnas internas entre los movimientos de pensamiento conservador y liberal y las crisis de gobierno después de la emancipación. Casos singulares como la Revolución mexicana y el Segundo Imperio francés de Maximiliano, para México; el Bogotazo y la Guerra de los Artesanos, en Colombia; y el conflicto armado y el sisma de Buenos Aires posemancipación en Argentina son ejemplos de la singularidad, las cuales se abordarán a lo largo del capítulo.

18 Es importante aclarar que por los cierres estadísticos para cada una de las ciudades a la disponibilidad de información, por la posibilidad de realizar comparaciones, por la estandarización de la proyección y la necesidad de identificar tendencias, se efectuó el análisis del metabolismo urbano en los últimos tres quinquenios. Sin embargo, la información más actualizada de la ciudad —al momento de editar este trabajo— se expone en la tabla 3b.

Este estudio regional muestra que las capitales —a partir de la diferencia cultural y geográfica— comparten una similitud metabólica que se verifica en un creciente consumo agregado y en un aumento natural de la entropía. Esta insostenibilidad urbana regional se exagera por las políticas neoliberales de crecimiento indefinido, por el espejismo de la disponibilidad ilimitada de capital y por el optimismo tecnocrático dominante.

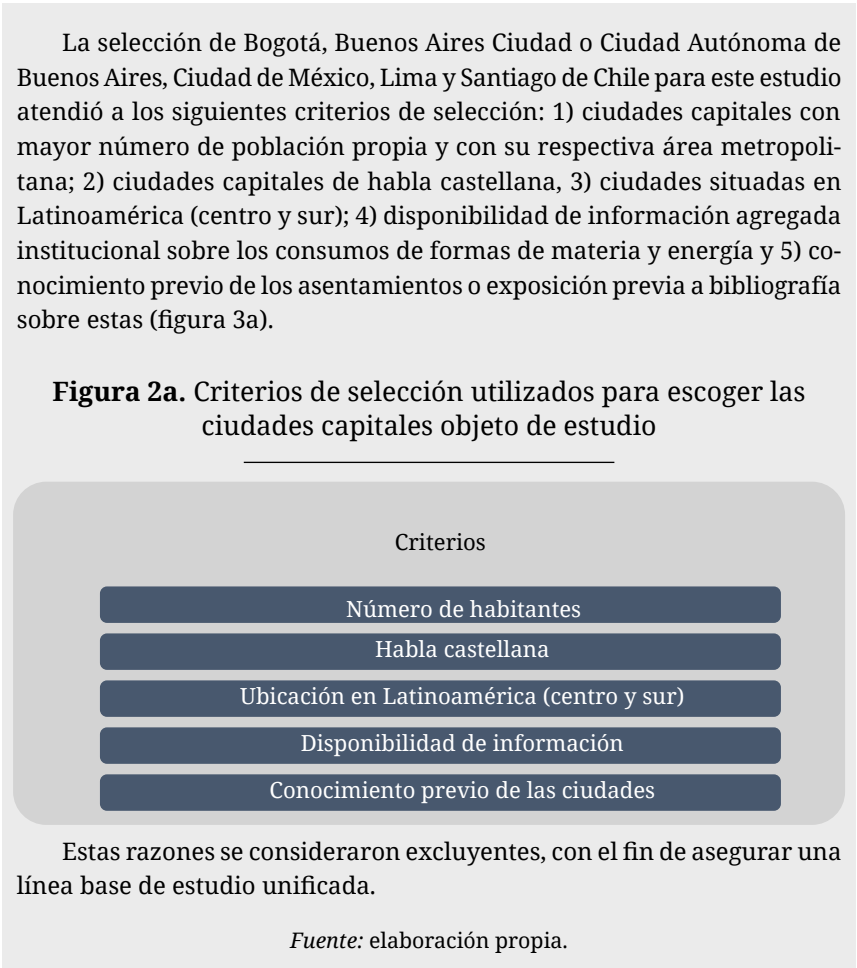
2.1. El sistema termodinámico abierto

Ante las distintas perturbaciones que experimenta a diario toda ciudad, esta depende de varios procesos fisicoquímicos para mantenerse en un estado pseudoestable, a saber: 1) la transferencia, transformación y uso de distintas formas de materia, energía e información en su interior y desde los alrededores y hacia ellos; 2) la actuación de mecanismos de retroalimentación negativa y la homeostasis para responder a las perturbaciones; 3) la disipación de entropía como estrategia para deshacerse del desorden y “olvidar” la perturbación y 4) la presencia y emergencia de atractores hacia los cuales el sistema evoluciona cuando —por alguna razón— se presenta un cambio de estado.

Todos estos procesos y fenómenos fisicoquímicos de transporte, manufactura, almacenamiento y uso se suscitan en un ambiente natural y antrópico en un contexto social, cultural, económico y político definido por un modelo capitalista, que considera la ciudad como una expresión de las fuerzas del mercado, la competencia y la acumulación de capital (Delgado, 2015), y en el que el consumo y la ineficiencia indefectiblemente provocan que una parte de los materiales y formas de energía sean disipados como única estrategia para mantener a la ciudad en estados pseudoestables, flujos que finalmente se traducen en emisiones, vertimientos o residuos (Bettini, 1998; Díaz, 2014; Ortiz *et al.*, 2016).

Por su parte, los productos útiles y la información generada ayudan a convertir el caos en orden y organización en el sistema, definiendo adelantos tecnológicos, cualificando los servicios, mejorando el área urbana y promoviendo la acumulación del capital, la reproducción de las fuerzas de trabajo y los procesos políticos y sociales (Delgado, 2015; Díaz, 2014). Esta vitalidad depende, entre

Tabla 2a. Criterios de selección para escoger las cinco principales ciudades capitales para el estudio



otras razones, de sus relaciones ecológicas con ecosistemas estratégicos, de la red de abasto y provisión con las zonas productoras y depósitos locales, regionales y globales y de la conectividad con otros asentamientos humanos¹⁹ para el flujo oportuno de mercancías y circulación de capital. También depende de la eficiencia y eficacia de los procesos internos de transformación y producción.

¹⁹ Capitales, ciudades capitales de departamento o estado, pueblos, villas y otros.

Por tal motivo, 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 identificar aspectos u operaciones críticas para el crecimiento económico, el desarrollo, el ambiente natural y construido y la oferta de bienes y servicios ambientales de las áreas de soporte y provisión (Díaz y Pulecio, 2016).

Por consiguiente, la metáfora organicista del concepto y metodología del metabolismo urbano, junto con el metaconcepto de la entropía²⁰, será la base para la verificación de la teoría y dinámica de sistemas y la complejidad en las cinco principales ciudades capitales de habla hispana en Latinoamérica. Así mismo, para la comprensión y representación de los principios naturales de conservación de la masa y la energía, de las leyes termodinámicas y de la disipación del desorden.

2.2. El metabolismo y la complejidad urbana en Latinoamérica

La concepción ecológica de las ciudades como superorganismos vivos puede considerarse un logro de la investigación transdisciplinaria, no solo por viabilizar la triada sistema natural/asentamiento humano/organismo y superar los planteamientos del funcionalismo estructural²¹, sino por la realizable articulación entre las dimensiones fisicoquímica, ecológica, urbanista, económica y social en trabajos teóricos y prácticos desarrollados por más de medio siglo.

La comprensión del cumplimiento de los principios de conservación de la materia y la energía en sistemas abiertos, en contexto y relación con el crecimiento económico, la producción, la infraestructura, la población y el comportamiento de los distintos sectores de la economía (Díaz y Pulecio, 2016), es una ganancia atribuida al trabajo

20 La entropía es un metaconcepto que implica trabajar en la complejidad, más cuando Illya Prigogine (2012) la considera como la principal ciencia de la complejidad.

21 Cabe aclarar que, en la corriente sociológica del Funcionalismo Estructural se concibió el concepto de *organismo* para explicar la estructura, funcionamiento y evolución de la sociedad y vida social, definida esta por Emile Durkheim (1986, p. 192) como la “sucesión ininterrumpida de transformaciones paralelas a otras transformaciones en las condiciones de la existencia colectiva”.

pionero de Abel Wolman (1965, p. 179), que demostró lo que ahora se considera una verdad de Perogrullo: la relación entre el consumo urbano y los desechos generados en una ciudad.

Los posteriores trabajos del siglo XX de Scott Cook (1971) sobre el flujo energético en las sociedades industriales; de Havlick (1974), al referirse al organismo urbano; de Herbert Girardet (1992), con su propuesta del Atlas Gaia de las Ciudades; de Peter Newman y Jeffrey Kenworthy (1999), sobre el impacto automotor en la pérdida de la calidad ambiental urbana; de Peter Newman (1999), con la inclusión del metabolismo urbano en la planeación urbana; y la nueva revisión del concepto por parte de Slawomir Hermanowicz y Takashi Asano (1999), dejaron clara la aplicabilidad del metabolismo en los estudios de análisis de sostenibilidad urbana.

Estos trabajos de fundamentación y consolidación del concepto fueron el pilar para posteriores estudios en este nuevo siglo sobre temas relacionados con la *energía²² urbana* (Haberl, 2001; Zhang *et al.* 2009a, 2009b), la sostenibilidad ambiental y el diseño sustentable (K'Akumu, 2007; Regollini y Junyent, 2009), la ecología industrial (Bruner, 2007), el modelado matemático (Levine, 2008), las relaciones entre los flujos rural y urbano (Toledo, 2008), el uso verde para el desarrollo sostenible (Kennedy, 2009), el análisis espacial y material de los flujos (Daniels, 2002; Idrus *et al.*, 2009), las implicancias del cambio climático (Delgado, Campos y Rentería, 2012), la capacidad y costo de la infraestructura instalada y proyectada (Martinelli, 2012), el diseño de planes urbanos metropolitanos (ERF, 2014) y estudios en ecología política urbana para el bien común (Delgado, 2017).

Estas actualizaciones y usos complementarios que ha tenido el concepto a lo largo de medio siglo han promovido trabajos desde la perspectiva de la ingeniería química, la economía ecológica, la arquitectura, la ecología política y el urbanismo, entre otras profesiones y ciencias, con el objeto de comprender, dimensionar y proyectar el me-

22 Estos autores la definen como la energía útil que se aplica sobre un sistema urbano para transformar formas de materia y energía en un determinado producto o servicio. Llamativo concepto que no se considera en esta investigación, toda vez que es ajeno a los enunciados originales de la termodinámica.

tabolismo urbano de este tipo de sistemas termodinámicos abiertos²³. Así mismo, han sido el *kick off* de debates interdisciplinarios y disciplinares para conocer la forma como las áreas urbanas funcionan y determinar su sostenibilidad y para evaluar la funcionalidad y las consecuencias ecológicas de la transformación de la infraestructura y funciones urbanas (Acebillo, 2012; Cárdenas, 2017, Díaz, 2014; Martinelli, 2012; Rapoport, 2011). De esta manera, se ha alcanzado una dimensión distinta de pensamiento sobre el futuro urbano ya que el concepto versa sobre la descomposición/muerte y crecimiento/vida urbana en una lógica de continuo cambio y evolución (Günel, 2017).

2.3. Estudios de metabolismo en Latinoamérica

Propiamente, en Latinoamérica se han realizado estudios de metabolismo urbano en Bogotá (Colombia) (Díaz, 2011; Díaz, 2013; Alfonso y Pardo, 2014 y Díaz *et al.*, 2016), en Ciudad de México (México) (Delgado, 2012), Punta Arenas (Chile) (Inostroza, 2013), Pereira y su Zona Metropolitana de Occidente (Colombia) (Serna *et al.*, 2014), Cuautla de Morelos (México) (Luna, 2015), Tandil (Argentina) (Villalba, 2016), Miramar (Argentina) (Testa, Bertoni y Maffioni, 2017) y Cuenca (Ecuador) (Jaramillo, 2017) y Toluca (México) (Montoya-García *et al.*, 2023), entre otras ciudades (figura 2b). Algunos de estos estudios desarrollan mayor resolución y detalle, como los realizados para la capital de la República de Colombia y la capital de la Provincia de Azuay (Ecuador), mientras que otros operan con grandes niveles de abstracción al priorizar aspectos económicos o urbanísticos, como los realizados en la otrora Tenochtitlán y el cono sur latinoamericano.

Ahora bien, a causa de la actual tendencia de realizar estudios comparativos, en Latinoamérica se han desarrollado trabajos encaminados a igualar, en proporción correspondiente, los siguientes conjuntos urbanos y áreas metropolitanas: 1) Ciudad de México y Santiago (Giubrunet *et al.*, 2016); 2) Bogotá, Buenos Aires, Brasilia, Ciudad de México, Caracas, Lima, La Paz, Quito y Santiago (Coronado, 2015) y 3) México Zona Metropolitana del Valle de México,

23 En términos de la termodinámica, las entradas de una ciudad son “metabolizadas” y transformadas por diversidad de artificios tecnológicos, técnicas, procesos y sistemas biológicos en forma de desechos y negentropía (Caputo, 2012).

São Pablo Metro, Lima-Callao, Bogotá, el Gran Buenos Aires, el Área Metropolitana de Caracas, Quito y Montevideo (Delgado, 2015). También existen estudios comparativos entre municipalidades de zonas metropolitanas, en los que destacan los trabajos de Montoya *et al.*, 2023 y Montoya y Díaz (2023).

Sin embargo, al auscultar al detalle las fuentes de información y los datos, se aprecia un uso repetitivo de las mismas referencias entre los distintos artículos y documentos de trabajo. Esta circularidad y reciclado tienden a distanciarse de las mejores fuentes de información, como son las empresas de servicios públicos, los departamentos de estadística, los ministerios y organizaciones gubernamentales y las propias alcaldías o municipalidades. Algunas de estas investigaciones también presentan cierto grado de imprecisión, al trabajar con cifras asimétricas temporales y espaciales, lo que no necesariamente les resta efecto en la visión agregada y global de la dimensión metabólica urbana.

2.4. Las condiciones iniciales en Latinoamérica: los pueblos originarios, el agua, la fundación y la Colonia

Las distintas circunstancias geográficas, momentos históricos y diversidad de pueblos originarios durante la conquista y la colonización de América definieron que los asentamientos y fundaciones no necesariamente atendieran con exactitud todas las indicaciones de las Ordenanzas de Poblamiento y Leyes de Indias. Las diferencias de diseño y trazado urbano atendieron, en algunos casos, el resguardo militar e intereses comerciales; en otros, el aseguramiento del dominio español y la ubicación de la población; y en otras tantas, la superposición de la idea de ciudad europea y nueva cultura sobre lo que existía originariamente (Brailovsky, 2012; Mejía, 2013).

Sin embargo, las cinco ciudades capitales de este estudio comparten dos elementos en común en su génesis, a saber: 1) la presencia, estancia o dominio de pueblos originarios en el área donde se realizó el asentamiento español y 2) la existencia, proximidad e influencia de cuerpos de agua dulce para satisfacer las necesidades de saneamiento y el riego de zonas fértiles para cultivo. Así, podría decirse que —como sistemas complejos— las actuales ciudades capitales aún mantienen una gran sensibilidad a las condiciones iniciales y están

fuertemente influidas por el elemento agua, que inadvertidamente terminó consolidándose como eje ambiental y rector del territorio.

Por tal motivo, en este estudio se considera, en principio, a los pobladores originarios o autóctonos y su relación con el vital líquido, para luego describir el devenir urbano durante la Colonia, la Repú-

Figura 2b. Ciudades de Latinoamérica donde se han realizado estudios de metabolismo urbano. Periodo 2010-2023



Fuente: elaboración propia.

blica, la ciudad del siglo XX y su expansión durante el siglo XXI. Una vez descrita la historia condensada, se analiza el metabolismo urbano durante los primeros cuatro quinquenios del siglo XXI en la lógica de metropolización y se describe la realidad actual. Por último, se realiza una proyección a 2025 del consumo, en la que se reconoce la falta total de predictibilidad del futuro y la extraordinaria ambivalencia ante el porvenir de los sistemas complejos (Morin, 2018).

Al final se deja al arbitrio del lector verificar si los casi trescientos años de predominio del centralista modelo español de ciudad seca, junto con el sincretismo alcanzado por la mezcla cultural entre europeos, pobladores originarios y esclavos provenientes de África, fueron la mejor opción para el desarrollo de los asentamientos humanos en Latinoamérica que los otrora de esquemas cooperativo asociativo e imperial y competitivo de los pueblos originarios, cuyo metabolismo estaba regulado principalmente por el agua, las creencias y los ciclos naturales.

2.5. Los pueblos originarios y el agua

Es un error común considerar que la historia de las ciudades capitales latinoamericanas comienza con su fundación española. En realidad, cuando los conquistadores Gonzalo Jiménez de Quesada (Bogotá-1538), Pedro de Mendoza y Juan de Garay (Buenos Aires-1536 y 1580), Francisco Pizarro (Lima-1535), Hernán Cortés (Ciudad de México-1521) y Pedro de Valdivia (Santiago-1541) llegaron ya existían sendos territorios dominados comercial, política y culturalmente por señoríos o imperios, reflejados en rutas de abasto, caminos, zonas agrícolas y asentamientos humanos con distintos tipos de arquitectura y distribución.

Cada ciudad fue distinta para los pobladores originarios, y murió al momento de la fundación de la segunda ciudad por los conquistadores y bajo el imaginario español. Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Lima, Ciudad de México y Santiago, como asentamientos humanos, murieron y nacieron de nuevo el mismo día (Mundy, 2015; Orrego, 2013).

Los muiscas en la sábana de Bogotá; querandíes, chanaes, timbúes, charrúas y guaraníes en el territorio bonaerense; incas y sus

antecesores limas, ichmas y coliques²⁴ en el valle del Rímac; los aztecas y demás pueblos asentados en el valle de México, el lago de Texcoco y Tenochtitlán y aledaños a ellos; y los mapuches en el valle del río Mapocho, eran los principales grupos que ocupaban, intervenían y gobernaban el territorio varios siglos antes de la llegada de los españoles, pueblos para los que el agua no solo se constituía en un bien preciado e ingenierilmente gestionado, sino que poseía un valor simbólico y una dimensión cultural.

Los mapuches, otrora pobladores de la zona de Santiago, consideraban el agua como un elemento fundamental en su mundo simbólico, no solo porque su origen se gestó después del Gran Diluvio provocado por la serpiente de los mares —Kai Kai Vilu— para limpiar la naturaleza, sino por la correspondencia entre el cielo y la tierra con los ríos Huenuleufú y Futaleufú, respectivamente, que equilibraban los mundos de las almas y de los hombres (Bengoa, 1996).

Por su parte, los querandíes, chanaes, timbúes, charrúas y guaraníes, que habitaron el actual territorio bonaerense, consideraron los ríos y cuerpos de agua como lugares donde habitaban antiguos espíritus que esperaban pacientemente el paso de los hombres para guiarlos; seres inmateriales dotados de razón, a quienes debía guardarse respeto por ser custodios y guardianes de la naturaleza (Abella, 2001; Birocco, 2009).

Los incas, últimos pobladores del valle del Rímac, bajo el mito de la Primera Creación, consideraban el agua como uno de los tres elementos primordiales que conformaban el universo y sus tres planos indisolubles: Hanan Pacha, como morada de los dioses; Kay Pacha, ocupado por los humanos y Ukhu Pacha, mundo de los muertos (Ibarra, 1997; López, 2008). De esta manera el agua adquirió funciones sobrenaturales, razón por la cual se realizaban ceremonias (danzas, sacrificios y ofrendas) ligadas a su sacralidad, tales como la

24 La cronología prehispánica de Lima inicia con la cultura Lima (200 a. C.-600), y son el mejor vestigio las pirámides truncas en el santuario de Pachacámac; con posterioridad, la cultura Ichma, en su fase de integración inicial Huari (600-1000), en la que destacó el patrón de enterramiento de fardos con falsa cabeza encontrados en Huallamarca, Cajamarquilla y Pachacámac, entre otros lugares. Luego, el predominio de los señoríos de Collique y de Ichma, tras la desintegración huari (1000-1470) con su icónico centro urbano de Mateo Salado; y finalmente, la conquista Inca (1470), cuya provincia de Pachacámac perduró hasta el arribo español (Orrego, 2013).

limpia de acequias, la fertilización de la tierra y el arme de caballeros (Carrión, 2005).

Para los pueblos autóctonos del valle de México, el agua era una fuerza cósmica que inicialmente estaba representada como una deidad: Chalchitlicue, diosa creadora del Cuarto Sol, cuyo periodo acabó con un terrible diluvio, que en equilibrio con las fuerzas de la tierra (Tezcatlipoca), el viento (Qetzalcoatl) y el fuego (Huehuetotl), permitía que el mundo estuviera en orden, viabilizando así una nueva Era o Sol (Chapa, 2012).

Finalmente, el agua para los primeros pobladores de la sabana de Bogotá —los muiscas— fue motivo de inspiración y culto, y por eso se le realizaron multiplicidad de ritos en tributo a la diosa Sie. Las ceremonias de correr la tierra, la consagración de los jeques y la muerte del cacique y las relacionadas con el nacimiento y la pubertad de la mujer, son otrora pruebas de ello. Así también, la leyenda de Guatavita, Bachué y Bochica (Díaz, 2011; Hernández, 1975, p. 176; Rodríguez, 2003, p. 40).

Infortunadamente, para la mayoría de los pueblos originarios de América, la conquista española y la evangelización católica ejercieron, en algunos casos, “su poderío como si la tierra estuviera culturalmente vacía” (González, 1998, p. 113) y en otros dieron lugar a sincretismos religiosos (Rivera, 2010). Por tal motivo, se modificaron sus pautas socioculturales y se condenó —entre otros— el culto al agua, que se redujo a una creencia pagana prehispánica sujeta a la herejía. Inexplicablemente se desconoció la sabiduría en cuanto a la hidráulica de canales, la hidrología, la ingeniería civil, la agricultura intensiva, la comprensión de los ciclos biogeoquímicos y del agua y la *biomímesis* de su actuar para la subsistencia, el crecimiento y el desarrollo de los asentamientos.

Sin embargo, no es extraño que el poblamiento español del valle de los Alcázares (Bogotá) por Gonzalo Jiménez de Quesada (1538), de la barranca próxima al Río de la Plata (actual Buenos Aires) por Pedro de Mendoza (1536) y luego por Juan de Garay (1580), del valle de Lima (Lima y Callao) por Francisco Pizarro (1534) y del valle del río Mapocho al amparo del cerro Huelén (Santiago) por Pedro de Valdivia (1541) obedecieran también a las bondades naturales del terreno y la cercanía a cuerpos de agua dulce (Brailovsky, 2010 y 2012; Del Castillo,

2016; Díaz *et al.* 2016; Herbstaedt, 2012). Es claro que estas fundaciones atendieron las Ordenanzas de Poblaciones, principalmente la número 11, de 1523, del rey Carlos V, a saber: “Procuren tener agua cerca y que se pueda conducir al pueblo y heredades, derivándola si fuere posible para aprovecharse de ella” (Leyes de los Reinos de las Indias, Recopilación de 1841, Tít. VII, Ley Primera, p. 27).

El caso de México es singular ya que Tenochtitlán, capital del Imperio mexica-azteca, tenía una población que oscilaba entre los 150 000 y 300 000 habitantes cuando Hernán Cortés la invadió con la ayuda de los tlaxcaltecas, texcocanos, totonacos y otros pueblos indígenas y se hizo a un emplazamiento con mejor infraestructura civil e hidráulica, saneamiento básico e iluminación que las ciudades europeas de la época (Escalante, 2016; Mundy, 2015; Passuth, 2015). Por tal motivo, el asentamiento y fundación del Ayuntamiento de México en el lago de Texcoco (1521) obedeció a la necesidad de dominar el territorio y entregar a la Corona española el más grande botín e imperio del Nuevo Mundo (Inafed, 2018).

Para los cinco asentamientos objeto de estudio, el nuevo diseño urbano atendió criterios técnicos, arquitectónicos y políticos de los españoles renacentistas. El trazado de cuadrícula o damero como distribución de planta básica para el ordenamiento, la afirmación de la centralidad en torno a la plaza mayor, la política imperial utópica de garantizar la “felicidad” de los pueblos y el fortalecimiento de la autoridad del imperio y el rey (Brailovsky, 2012; Mejía, 2013) se impusieron sobre lo que ya existía en algunos casos (Bogotá, Buenos Aires Ciudad) y en otros se adaptaron siguiendo el trazado inicial (Lima, Ciudad de México y Santiago).

2.6. El devenir de las ciudades latinoamericanas

Las ciudades capitales latinoamericanas adquirieron el principal *statu quo* en las nacientes repúblicas, gracias al modelo de Estado centralista impuesto por las oligarquías provinciales que llevaron en hombros las luchas emancipadoras (Mejía, 2013). Por tanto, Bogotá —otrora Santafé de Bogotá—, Buenos Aires Ciudad —anteriormente llamada Buenos Aires—, Ciudad de México —otrora Distrito Federal—, Lima y Santiago avasallaron todas las demás urbes y asentamientos humanos provinciales, al erigirse como motores de aparente progre-

so, centros de poder, producción, consumo y acumulación de capital, además de nodos de conexión regional y supranacional.

Este protagonismo —con la concomitante expansión y conurbación en la periferia— ha implicado un precio termodinámico que se expresa en la contaminación de los cuerpos de agua, la congestión vehicular, la pérdida de la calidad del aire, el ahogamiento en las propias basuras, el deterioro de suelos y zonas de conservación urbana, así como el afloramiento de males urbanos asociados con la densificación en zonas de especulación inmobiliaria.

El déficit de vivienda social, los mercados informales de uso del suelo y la urbanización ilegal, la falta de servicios básicos en barrios populares, la inseguridad y la segregación, la desigualdad, la marginalidad, la gentrificación y la polarización espacial son algunos de los problemas adicionales que continuamente afrontan las ciudades capitales latinoamericanas en su conversión a metrópolis del siglo XXI. A esta realidad hay que añadirle la enorme vulnerabilidad ante la variabilidad climática y los desastres naturales, reflejada sobre todo en los más pobres (Bayón, 2016; Cataño, 2012; Clichevsky, 2003, 2006; Imaz y Camacho, 2016; Leal, 2016; Romero *et al.*, 2016; Sabatini, 2016; Segovia y Jordán, 2005; Vanegas, 2012; Winchester, 2006).

Ante este galimatías, las ciudades capitales continúan esforzándose para ser prósperas en lo relacionado con la calidad de vida, la equidad, la sustentabilidad ambiental, la productividad y la infraestructura, desarrollando —con funciones propias y nacionales— programas locales e integrales financiados con recursos propios y transferencias (Cetrángolo, 2007; De Matos, 2016; Schteingart, 2016; UnHabitat, 2018). Así mismo, con el esquema de aglomeración y conurbación atienden los desafíos de su crecimiento con la esperanza de ser competitivas y de alcanzar la mejor forma urbana posible para reducir su impacto ambiental y construir socialmente el territorio (Benavides, 2012; Birkeland, 2008; Heynen, 2016).

2.6.1. Las ciudades y su área metropolitana

Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Ciudad de México, Lima y Santiago conforman sendas aglomeraciones urbanas complejas con distintas unidades territoriales político-administrativas en su entorno inmediato (tabla 3a). Este fenómeno de aglomeración —que sobrepasa

los límites administrativos de la ciudad— presenta problemas de coordinación y superposición de competencias entre los suburbios autónomos y conurbaciones fragmentadas en lo concerniente al gobierno, la institucionalidad, al esquema administrativo y la vida en comunidad (Agulles, 2017; Rodríguez y Oviedo, 2001; Stephens y Wikstrom, 2000).

Además, la expansión de la mancha urbana involucra marcados contrastes entre áreas modernas, limpias y de gran poder adquisitivo y flujo de capital, con extensas urbanizaciones y asentamientos sub-normales, donde la baja calidad de vida, la violencia y la inseguridad, la deficiente calidad y cobertura de servicios básicos y la pobreza²⁵ son la constante. Este sórdido contraste se atribuye al pobre planeamiento urbano en contextos de una enorme inercia en el rezago de la infraestructura, a la incipiente política de densidad constructiva, al crecimiento desmedido de su población, a la segregación e injusticia ambiental y social, a la falta de honestidad de los gobiernos y, como se verá más adelante, a la disipación de entropía y relocalización interna del desorden urbano (Agulles, 2017; Benavides, 2012; Díaz y Pulecio, 2016).

Al no obedecer a una lógica de sistemas aislados, autocontenidos o estructuras fijas, esta realidad latinoamericana (tablas 2b y 2c) se define por la aglutinación de un número considerable de habitantes, en una relación entre mercados locales de trabajo, número y tiempos de viaje cotidiano y tensiones de poder entre diferentes conurbaciones con distintas actividades y sectores productivos reinantes (Bayón, 2016; Magnusson, 1996; Sánchez, 2016).

Estas fuerzas del mercado y de relación entre las personas y los territorios han definido regiones que en algunos casos muestran éxitos notables en el crecimiento de sus economías, mejoras en la competitividad, atracción de talento y capital, eficiencia en el uso

25 Según Rubén Kaztman (2003, p. 9), en el sistema urbano existen cuatro tipos de vecindarios pobres, a saber: 1) aquellos formados primariamente por migrantes internos que llegan a la ciudad, que tienen una débil capacidad de procesar y articular demandas individuales en demandas colectivas; 2) los barrios obreros tradicionales, en los que existe una conciencia de clase relativamente robusta, en la cual el microcosmos social que surge en torno al trabajo es reforzado por la sociabilidad del vecindario; 3) los vecindarios populares urbanos, cuya antigüedad y heterogeneidad de los residentes es significativa; y 4) los guetos urbanos, cuyas condiciones socioeconómicas no favorecen la movilidad individual ni colectiva de los pobres urbanos.

de infraestructura, usufructo de bienes y servicios ambientales y salvaguarda del ambiente natural y salud de las personas (Acevedo, *et al.*, 2009), pero que en otros son un desastre de aglomeración, donde la significación fracasa, los lazos comunitarios son inexistentes y en las cuales el consumo es la razón de la existencia (Agulles, 2017; Ferguson, 1999), algo muy común en las ciudades de economías emergentes, países en vías desarrollo y Estados fallidos.

En la tarea de proveer servicios y herramientas para que sus habitantes logren sus aspiraciones realizando actividades que les generen bienestar, ambas realidades reflejan sendos modos de interpretación y análisis del megasistema, a saber: 1) la ilusión ante el optimismo del nuevo urbanismo y 2) la profecía del apocalipsis urbano (Gandy, 2005; Tyler, 2018).

En lo que a la metropolización se refiere, es evidente que es un fenómeno consolidado en las ciudades capitales de Latinoamérica, justificado en el aspecto político por la aparente artificialidad de los límites municipales y en el económico por la posibilidad de generar potencialidades de mercado, economías de escala, producción intensiva de conocimiento, bienes y servicios y un aparente mayor bienestar (Chiriví, 2016; Katz, 2016). Sin embargo, ante este fenómeno, es importante subrayar que las ciudades capitales inmersas en semejantes manchas urbanas aún son el referente por excelencia, no solo por concentrar en su espacio múltiples actividades económicas, sino por reflejar la identidad nacional en una diversidad poblacional y ser el referente político, administrativo y gubernamental de cada país (Bertaud, 2016; Schlickewei, 2016).

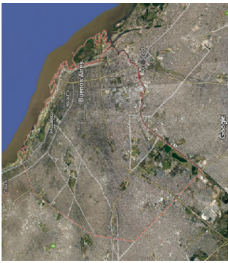
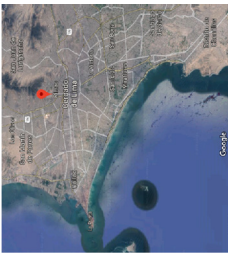
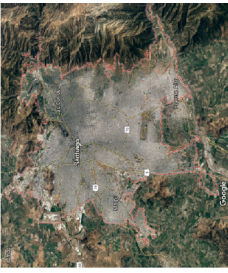
Esta variedad de atractivos en las ciudades capitales puede expresarse como una característica que posibilita múltiples estados de evolución urbana, razón por la cual es posible considerarlos *atractores termodinámicos* (Prigogine, 1997): porque dan lugar a nuevas propiedades del comportamiento temporal y espacial en el no-equilibrio.

En ese sentido, es conveniente verificar la participación actual de la ciudad capital en el contexto metropolitano, comprender la forma como se estructura y condiciona el entorno y dimensionar el

Tabla 2b. Información básica de las ciudades capitales analizadas en el contexto de metropolización^(a)

Ciudad	Área urbana (km ²)	Área metropolitana (km ²)	División político-administrativa	Población (millones)	Coefficiente de Gini	Pobreza extrema (%)	Altura (m s. n. m.)	Precipitación anual (mm)	Estacionalidad
Bogotá	350	Distrito Capital: 1732	20 localidades (19 urbanas + 1 rural)	8081	0,498 (2015)	2,4 (2017)	2640	866	Comportamiento bimodal de lluvias y época seca
Buenos Aires	200	Aglomeración Gran Buenos Aires: 1640	15 comunas	2890	0,895 (2017)	3,1 (2017)	25	1192	4 estaciones
Ciudad de México	630	Aglomeración con delegaciones: 1485	16 delegaciones	8900	N. D.	N. D.	2240 _(min) 3930 _(max)	900	4 estaciones (influencia estacional)
Lima	775	Lima Callao:	43 distritos (Provincia de Lima) 7 distritos (Provincia de Callao)	8575	0,320 (2016)	3,8 (2016)	150	10	2 estaciones (invierno y verano)
Santiago		Región Metropolitana: 15 403	32 comunas (Agrupación urbana)	6209	0,498 (2015)	2,1 (2015)	342	567	4 estaciones

(Continúa)

Ciudad	Área urbana (km ²)	Área metropolitana (km ²)	División político-administrativa	Población (millones)	Coefficiente de Gini	Pobreza extrema (%)	Altura (m s. n. m.)	Precipitación anual (mm)	Estacionalidad
Bogotá									
									
Buenos Aires									
									
Ciudad de México									
									
Lima									
									
Santiago									
									

(a) Los valores de población corresponden a la circunscripción administrativa urbana, no al área metropolitana.

Fuente: elaboración propia con información de las administraciones municipales.
Mapas —visión 3D— obtenidos en el aplicativo Google Maps ® (2018)

Tabla 2c. Contexto histórico y condiciones iniciales —pueblos originarios— de las ciudades capitales

Ciudad	Condiciones iniciales	Modelo español de ciudad		Consolidación de la identidad nacional			Globalización
		Fundación	Colonia	Emancipación	República	Ciudad del siglo XX	
Bogotá	Muiscas Sie, diosa del agua. Agua: elemento de inspiración y culto.	1538 (6 agosto) Gonzalo Jiménez de Quesada.	Capital del Nuevo Reino de Granada.	1810 (20 julio) 1819 (7 agosto). Capital del departamento de Cundinamarca.	Obras de infraestructura. Asalto militar, Guerra de los Artesanos (1854).	Expansión urbana e ilegal. Bogotazo (1948) y violencia partidista. Dictadura de Gustavo Rojas Pinilla (1953-1957). Terrorismo: M19, Ejército de Liberación Nacional (ELN), Ejército Popular de Liberación (EPL), toma del Palacio de Justicia (1985). Terrorismo y narcotráfico.	Ciudad extendida siglo XXI Expansión urbana. Conurbación. Crecimiento urbano en un “contexto de paz”. Problemas ambientales: aire y agua.
Buenos Aires	Querandíes, chanaes timbúes, charrúas y guaraníes. Cuerpos de agua: lugar donde habitan los espíritus.	1536 (3 febrero) Pedro de Mendoza. 1580 (11 junio) Juan de Garay.	Capital del Virreinato del Río de la Plata	1810 (25 mayo). 1816 (9 julio). Capital de la Provincia.	Obras de infraestructura. Capital de la República (1860). Política migratoria.	Urbanización y expansión urbana. Peronismo (1946-1955). Gobiernos inconstitucionales: Gobierno promisorio (1930-1932). Revolución del 43 (1943-1946). Revolución Libertadora (1955- 1958). Revolución Argentina (1966-1973). Reorganización (1976-1983).	Consolidación de la Aglomeración de Buenos Aires. Problemas ambientales: agua.

(Continúa)

Ciudad	Condiciones iniciales	Modelo español de ciudad		Consolidación de la identidad nacional			Globalización
	Pueblos originarios y el agua	Fundación	Colonia	Emancipación	República	Ciudad del siglo XX	Ciudad extendida siglo XXI
Ciudad de México	Aztecas Chalchitlicue (4.º Sol) diosa del agua. Agua: fuerza cósmica.	1521 (13 agosto) Hernán Cortés. Ejércitos tlaxcaltecos tetzcoconos totonacos.	Capital del Reino de la Nueva España.	1821 (24 agosto). Tratados de Córdoba. Capital de los Estados Unidos Mexicanos.	Distrito Federal. Ocupación de tropas norteamericanas (1847). Ocupación francesa y reinado de Maximiliano (1862-1867). Porfirato.	Revolución social (1910-1920). Guerra Cristera (1926-1929). Revolución Estudiantil (1968). Terremoto (1985).	Constitución Política de la Ciudad de México (CDMX). Conurbación. Problemas ambientales: aire, agua y suelo.
Lima	Incas Agua: elemento fundamental que conforma el universo. Mito de la primera creación: Pacha Hanan, Kay y Ukhu.	1535 (18 enero) Francisco Pizarro.	Capital del Virreinato del Perú. Terremoto (1746).	1821 (28 julio). Capital de la República del Perú.	Obras de infraestructura. Demolición de la muralla de Lima. Invasión de tropas chilenas (1881- 1883). Guerra Civil (1895).	Urbanización y expansión urbana. Migración provinciana. Gobierno revolucionario de las Fuerzas Armadas (1968-1980). Terrorismo Sendero Luminoso (1980-2000).	Crecimiento urbano explosivo y disperso. Crecimiento económico por encima del promedio nacional. Problemas ambientales: agua.

(Continúa)

Ciudad	Condiciones iniciales	Modelo español de ciudad		Consolidación de la identidad nacional			Globalización
	Pueblos originarios y el agua	Fundación	Colonia	Emancipación	República	Ciudad del siglo XX	Ciudad extendida siglo XXI
Santiago	Mapuches Agua: elemento fundamental en el mundo simbólico.	1541 (12 febrero) Pedro de Valdivia.	Capital de la Capitanía General de Chile.	1810 (12 febrero). Capital de la República de Chile	Comuna de Santiago como corazón fundacional de la capital.	Urbanización y expansión urbana. Represión social. Semana Roja (1905). Dictadura de Augusto Pinochet (1973-1990).	Ciudad de economía neoliberal. Consolidación de la Región Metropolitana de Santiago. Crecimiento urbano. Problemas ambientales: aire.

Fuente: elaboración propia. Síntesis de las referencias bibliográficas del capítulo 3.

esfuerzo termodinámico que realiza para seguir siendo competitiva²⁶ en una situación global. Por tal motivo, el estudio del metabolismo urbano de estas entidades administrativas considerará el consumo de energía eléctrica y principales combustibles fósiles, la distribución y facturación del agua potable y el consumo de alimentos y bebidas como entradas al sistema y los vertimientos, las pérdidas de agua, las basuras generadas y los gases efecto invernadero como salidas, todo en un contexto histórico y respecto a la población y el crecimiento económico.

2.6.2. Bogotá

Situada en un valle fluvio-lacustre, la ciudad fue consecuencia de la expedición española del Río Grande de la Magdalena y Mar del Sur, encomendada por Pedro Fernández de Lugo a Gonzalo Jiménez de Quesada, que erigió el asentamiento español —en el territorio del zipazgo de la Confederación Muisca— el 6 de agosto de 1538. Esta posición militar de defensa estratégica permitió guarecer las huestes expedicionarias²⁷ del asedio de los originarios habitantes y sumar argumentos sólidos del conquistador para la solicitud de retribuciones por sus actos (Avellaneda, 1988, p. 306; Zambrano *et al.*, 2003).

Sin embargo, la definición jurídica y organización formal del asentamiento se hizo en abril de 1539, su reconocimiento y título como ciudad se logró el 27 de julio de 1540 por virtud de una real orden de Carlos V, rey de España y su distinción como arzobispado (1564) “significó su supremacía religiosa en todo el territorio del Nuevo Reino de Granada” (Brodhant, 1988, p. 5) (Díaz, 2011; Díaz *et al.*, 2016; González, 1978; Groot, 1957).

Siendo capital del virreinato, la otrora Santafé tuvo un lento crecimiento poblacional y de extensión urbana, cuyo déficit de infraestructura y servicios públicos básicos²⁸ se mantuvo hacia finales

26 Es menester advertir que la competitividad implica también brindar una posibilidad de desarrollo de la mano con la naturaleza y las personas, algo que no necesariamente están logrando estas ciudades ni sus áreas metropolitanas.

27 Zambrano *et al.* (2003) estiman una tropa expedicionaria que alcanzaba la cifra de 174 hombres.

28 Esta deuda se atribuye a que España tenía como principal objetivo el enriquecimiento de la Corona, y porque no era conveniente dotar de industria, comercio e infraestructura a “no ciudadanos” con deseos de libertad.

del siglo XVIII, lo que incrementó el desorden urbano y el descontento social ante el aumento de la población²⁹ (Díaz, 2011; Silvestre, 1789; Vargas, 1990, p. 87; Zambrano *et al.*, 2003). No obstante, este ralentizado asentamiento, bajo el sistema de trabajo obligatorio de la *mita leñera y urbana*, ejerció una fuerte presión sobre las selvas altoandinas de la sabana y cerros tutelares que las llevó a su total deforestación, mientras que diezmaba paulatinamente a indígenas y mestizos (Salcedo y Zeiderman, 2008).

Después de la gesta emancipadora y por la ley fundamental de la República de Colombia de 1819, la ciudad obtuvo el nombre de Bogotá y fue designada capital del departamento de Cundinamarca³⁰; y por ley del 25 de junio de 1824 adquirió la definición de municipio. Este cambio simbólico y político administrativo se acompañó de la sanción de normas jurídicas y de urbanidad que propendieron al cumplimiento de las virtudes cívicas y cristianas (Díaz, 2011; Pedraza, 1999).

Durante la segunda mitad del siglo XIX, bajo un clima de inestabilidad política de una incipiente y volátil república, la capital sufrió un cruento asalto militar³¹ (1854) que deterioró aún más la pobre infraestructura que ya existía (Díaz, 2011; De Mosquera, 1855). Después de este suceso, lentamente fue consolidando el transporte colectivo (1882-1884), la recolección de basuras y el teléfono (1884), el acueducto en tubería de hierro (1886-1888), la energía para el alumbrado público (1889), el ferrocarril (1890) y la energía residencial (1900). Fueron estos los cimientos de ciudad moderna insuficientes y descoordinados, lo que mantuvo el atraso urbano, el cual se exacerbó con las restricciones de expansión ordenada por causa del déficit de tierras propias en territorios inmediatos, que impuso una densificación en condiciones no apropiadas (Alba, 2003; Díaz, 2011; Wiesner, 1978; Zambrano, 2002, 2003).

El punto de inflexión en el devenir de Bogotá —y de Colombia también— se presentó el 9 de abril de 1948 con el asesinato del líder

29 El crecimiento fue vegetativo y por migración, el cual cuadruplicó en el siglo XVII la población de la ciudad.

30 La ley fundamental de la República de Colombia de 1819 decretó que la antigua Capitanía General de Venezuela y el Virreinato del Nuevo Reino de Granada se consolidarían en una sola, bajo el título glorioso de República de Colombia (arts. 1 y 2).

31 Asalto comandado por el general Tomás Cipriano de Mosquera, en la campaña de dilución del motín del general José María Melo en la llamada República Artesana.

político Jorge Eliécer Gaitán, en momentos de gran tensión y violencia partidista entre liberales y conservadores, la cual se venía gestando desde principios del siglo XX. Los resultados inmediatos de ese ominoso día fueron los siguientes: la muerte del caudillo, su supuesto asesino y de más de tres mil personas —aunque no hay cifras oficiales—; una ciudad en llamas, edificaciones convertidas en escombros, automóviles y tranvías reducidos a pavesas, raterismo y saqueo. Las pérdidas económicas ascendieron a quinientos millones de pesos de la época (Aljure, citado en Alape, 1983, p. 354; Bermúdez, 1995, p. 26; Castelblanco, 2003; Díaz, 2011; Martínez, 1978, p. 196; Salazar, citado en Alape, 1983, p. 344).

Después de este trágico acontecimiento, la capital colombiana se convirtió en el mayor receptor de desplazados por la violencia en el país, sufrió un cambio arquitectónico significativo y se extendió descontrolada y vertiginosamente³² de norte a sur, anexando municipios vecinos³³ bajo el esquema administrativo de distrito especial (1953). Así mismo, expresó diversos problemas económicos y sociales que frenaron los ideales de ciudad moderna e incluyente (Hernández, 2004; Ocampo, 1994).

En respuesta al problema urbano y en aras de reconstruir el centro tradicional devastado por los sucesos de 1948, los arquitectos Charles Le Corbusier, Paul Lester y José Luis Sert presentaron sendas propuestas de Plan Piloto (1949) y Regulador (1951) para Bogotá y su región, las cuales no se materializaron por causa de las fuertes críticas de la época, que consideraron el proyecto como excedido, optimista y excesivamente funcionalista (Castelblanco, 2003; Díaz, 2011; Martínez, 1978, p. 196). Sorprendentemente, la reingeniería capitalina solo se logró realizar —de manera parcial— durante la dictadura del general Gustavo Rojas Pinilla (1953-1959) con la construcción del aeropuerto Eldorado, el Centro Administrativo Nacional (CAN), la autopista Norte y muchas vías internas principales.

Sin embargo, la ilegalidad y un inexistente modelo de planeación ocasionaron, durante el siglo XX y comienzos del XXI, un desenfrena-

32 Principalmente por causa del uso informal de suelo de parte de urbanizadores ilegales y, de manera formal, por proyectos urbanísticos aislados.

33 Bogotá anexó los siguientes municipios, que convirtió en localidades: Usaquén, Suba, Engativá, Fontibón, Bosa y Usme.

do incremento del área urbana —que alcanzó para el año 2000 una extensión aproximada de trescientos kilómetros cuadrados— dominada por dos tipologías arquitectónicas: los conjuntos cerrados y los centros comerciales (Mayorga, 2016; Misión Siglo XXI, 1996; Montaña, 2004). En esta época también se aumentaron el total de viajes al día y la tasa de motorización privada (vehículos y motocicletas), se redujo la velocidad vehicular promedio y se exacerbó la contaminación atmosférica; todo esto en un contexto poblacional de fase inicial de una segunda transición demográfica (Galvis, 2013; Gómez y Obando, 2014; Pombo, 2017) (tabla 2d). Por otro lado y desde la legalidad de la producción del suelo, se buscó la revitalización de predios y barrios tugurizados y la construcción de vivienda de interés social en lotes urbanos (Integration, 2013; Humanidad, 2013).

En la actualidad y bajo el supuesto del posacuerdo de paz con la otrora guerrilla de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC), la capital colombiana presenta casi veintiún mil asentamientos ilegales con una exigua cobertura en servicios públicos y vías. Así mismo, busca terrenos urbanizables en áreas de reserva forestal, como la de Thomas Van der Hammen, mientras que peligrosamente consolida la ciudadela Nuevo Usme en proximidad al páramo de Sumapaz, que es el mayor ecosistema estratégico para la supervivencia de la ciudad en el futuro (Gómez, 2016; Semana, 2017), ambos proyectos apoyados en su totalidad por la banca de inversión, el sector privado y organismos multilaterales como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal)³⁴.

Finalmente, la ciudad oculta una desaceleración cuyos primeros síntomas se aprecian en las marcadas fuerzas centrífugas que han promovido la desindustrialización y la reubicación de zonas francas en municipios del conurbano y también, en la caída en la construcción y la reducción en la participación en el producto interno bruto (PIB) nacional (Gossaín, 2016). A estos hechos se suman la inexistente política poblacional, de diseño urbano e ingeniería municipal, la contaminación creciente, la inseguridad, la desigualdad y el movimiento

34 En la lógica crematística, estos proyectos se apoyan en su totalidad, por considerarse los mejores ejemplos urbanísticos de aplicación de nuevos instrumentos para luchar contra la ilegalidad (Clichevsky, 2006).

Tabla 2c. Información de los principales flujos de materia y energía para Bogotá, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025

Bogotá															
Año	POBLACIÓN	PBI MM USD	AGUA			ENERGÍA Eléctrica GWh	COMBUSTIBLES			ALIMENTOS		BASURAS		GEI kt CO ₂ /Eq	
			DIST m³/s	CONFAC m³/s	PERD %		VERT m³/s	GN kt/año	Gasolina kt/año	Fuel Oil kt/año	FRU/VER,CARN kt/año	Bebidas m³/año	t/día		t/año
2000	6.302.881	25.842	18,0	12,6	30	5,4	16,6	231,9	1.015	418	2.556	N.D.	4.662	1.701.630	15.572
2005	6.840.116	37.621	14,0	8,2	41,6	5,8	16	372,5	651	652	2.304	741.772	5.247	1.915.155	16.100
2010	7.247.795	60.881	14,7	8,6	41	6,0	16,4	467,8	638	615	2.800	895.836	6.039	2.204.235	16.279
2015	7.862.277	94.402	15,4	9,5	38	5,9	16,8	591,6	648	727	4.303	1.049.840	6.246	2.279.790	12.784
2025	8.858.591	138.083	16,8	10,9	34,8	6,0	17,6	20.102	829	930	5.262	1.357.918	7.411	2.705.008	17.412

Fuente: elaboración propia con información de Alcaldía Mayor de Bogotá (2016), Díaz (2011), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2016), Observatorio Ambiental de Bogotá (OAB) (2018), Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2014), Secretaría Distrital de Hacienda (2014) y Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2015).

regionalista que propone “un país más cerca al mar y más lejos de las estrellas” (Caballero, 2013, p. 7).

Bogotá, con casi ocho millones cien mil habitantes, es hoy un producto de históricos gobiernos mediocres y mezquinos que no supieron equilibrar las exigencias inmediatas de los habitantes con los requerimientos de infraestructura, servicio y empleo (Dávila, 2013; Quijano, 2014) necesarios para afrontar los retos que presenta la globalización, la regionalización y el arraigo local.

2.6.3. Buenos Aires

La capital de la República Argentina se encuentra sobre la orilla occidental del Río de la Plata —región centro oriente del país— en una llanura de origen sedimentario que combina un puerto natural (el Riachuelo) con una barranca elevada, condición natural que cumplía con los requisitos para su doble fundación por parte de Pedro de Mendoza (1536) y Juan de Garay (1580) (Brailovsky, 2010).

Al ser un asentamiento humano totalmente periférico a los grandes virreinos de la Colonia, su crecimiento durante los siglos XVI y XVII fue lento, manteniéndose principalmente por su valor estratégico para frenar las pretensiones portuguesas. Para el siglo XVIII, se convirtió en la capital del Virreinato del Río de la Plata (1776), perfilándose como enclave agroexportador, puerto accesible en el Atlántico Sur y obligado hito en la ruta al cabo de Hornos (BAC, 2011; Mejía, 2013).

Después de la emancipación del territorio en 1810 (25 de mayo) y del posterior conflicto entre provincias argentinas, Buenos Aires mantuvo un bajo ritmo de crecimiento económico y poblacional que no ejerció presión alguna sobre las zonas rurales y urbanas próximas (Brailovsky, 2010). Solo desde la reinserción —ciudad y provincia— a la República en 1860, la ciudad creció en población gracias a la política migratoria, que atrajo familias completas provenientes de Europa y Oriente Próximo, migración que se mantuvo hasta mediados del siglo XX (BAC, 2018).

Durante la segunda mitad del siglo XIX y mitad del siglo XX se consolidó la centralidad, se otorgó función y categoría a los barrios, se logró el tendido de redes de agua corriente (1869), acueducto y alcantarillado, se construyeron grandes líneas férreas, se inauguró el primer subterráneo del continente (1913) y se dio origen al servicio

Tabla 2e. Información de los principales flujos de materia y energía para Buenos Aires Ciudad, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025

Buenos Aires															
Año	POBLACIÓN	PBI MM USD	AGUA				ENERGÍA Eléctrica GWh	COMBUSTIBLES			ALIMENTOS		BASURAS		GEI kt CO ₂ Eq
			DIST m³/s	CONFAC m³/s	PERD %	VERT m³/s		GN kt/año	Gasolina kt/año	Fuel Oil kt/año	FRU/VER,CARN kt/año	Bebidas m³/año	t/día	t/año	
2000	2.776.138	N.D	39,0	22,6	42	16,4	N.D.	9.644	3.628	N.D.	N.D.	N.D.	5.352	1.953.480	13.464
2005	2.890.151	37.542	39,3	22,8	42	16,5	N.D.	10.125	3.212	320,0	265,7	1587	419.484	1.296.480	13.252
2010	2.854.267	32.630	39,8	23,1	42	16,7	N.D.	11.506	2.736	480,3	307,6	N.D.	N.D.	1.428.610	15.883
2015	3.086.680	129.850	40,5	23,5	42	17,0	58	12.412	2.745	647,7	241,8	1209	622.344	1.524.605	12.929
2025	3.241.757	204.913	41,0	23,75	42	17,2	60,9	14.312	1.987	974,3	235,9	831	825.204	1.758.753	14.241

Fuente: elaboración propia con información de Banco Mundial (2012), Buenos Aires Ciudad (2015), Cámara Argentina de la Construcción (2010), Caride (2007), Centro de Estudios para el Desarrollo Económico Metropolitano (Cedem) (2014), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (2015), Ministerio de Economía (2016), Ministerio de Energía y Minería (2018), Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda (2017) y Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (2016).

público de transporte automotor (1920) (Macri, *et al*, 2011). Después, en el periodo denominado Peronismo (1946-1955) se definió el Gran Buenos Aires como la sumatoria del área urbana y rural, más los 17 partidos vecinos de la capital, esquema administrativo que no evitó la desaceleración económica generada en la segunda mitad del siglo XX y que solo desde el inicio del siglo XXI se subsanó (BAC, 2018).

La actual Ciudad Autónoma de Buenos Aires —que ha mantenido una población estable por casi medio siglo— refuerza la metropolización en virtud de los procesos de urbanización de los partidos de la Provincia de Buenos Aires que la rodean, haciendo que el crecimiento poblacional se haya presentado en el conurbano desde finales del siglo XX (Braylovsky, 2012; Szklowin, 1984) (tabla 2e).

En la actualidad, la ciudad experimenta una homogenización del paisaje urbano y un favorecimiento de negocios inmobiliarios con la construcción masiva en altura³⁵ y la urbanización sobre terrenos inundables. Además, presenta los mismos problemas ambientales de las demás urbes latinoamericanas, a saber: 1) la contaminación de los principales cuerpos de agua (Río de la Plata, Matanza y Riachuelo), 2) la saturación de los vertederos de basura que modifican el paisaje, 3) la pérdida de calidad del aire, 4) la contaminación y presencia en el ambiente de sustancias peligrosas para la salud, 5) la contaminación electromagnética y 6) la pérdida del arbolado urbano y zonas de reserva y conservación natural urbana, entre otros (Brailovsky, 2012; Clichevsky, 2002; APRA, 2018).

Finalmente y desde el punto de vista ambiental, social y operativo, se puede decir que la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, cuya población alcanza los 2,9 millones de personas, presenta una configuración urbana que traslada la jurisdicción autónoma, obtenida en la Constitución de 1994, a la Aglomeración Gran Buenos Aires (AGBA), donde la pobreza, los problemas urbanos ambientales y los conflictos correspondientes se expresan en mayor medida.

2.6.4. Lima

Fundada el 18 de enero de 1535 con el nombre de la Ciudad de los Reyes, Lima —del nombre indígena Limaq— se constituyó durante

35 En virtud de la modificación del Código de Planeamiento Urbano.

Tabla 2e. Información de los principales flujos de materia y energía para Lima (no incluye Callao), para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025

Lima												
Año	POBLACIÓN	PBI MM USD	AGUA			ENERGÍA Eléctrica GWh	COMBUSTIBLES			ALIMENTOS		GEI kt CO ₂ Eq
			DIST m ³ /s	CONFAC m ³ /s	PERD %		GN kt/año	Gasolina kt/año	Fuel Oil kt/año	FRU/VERCARN kt/año	Bebidas m ³ /año	
2000	6.577.100	N.D	21,9	12,0	45,1	16,9	9,17	438	1.020	1.480	N.D.	14.829
2005	7.237.745	41.322	22,2	12,5	43,9	16,2	68,1	369	1.123	1.976	636.627	15.927
2010	7.796.400	58.171	22,8	14,2	37,7	16,9	289,8	674	1.775	2.190	705.574	22.415
2015	8.410.500	67.221	23,5	16,5	29,8	17,7	443,7	744	2.082	2.581	781.364	24.076
2025	9.629.800	94.437	23,5	19,4	19,9	18,2	728	964	2.813	3.303	924.945	31.595

Fuente: elaboración propia con información de Banco Central de la Reserva del Perú (2018), Comisión Multisectorial de Seguridad Alimentaria y Nutricional (2013), Empresa Municipal de Mercados S. A. (2018), Equilibrium (2016), Guillermo Yepes y Klas Ringskog Consultores (2002), Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (2000, 2015, 2018a, 2018b), Instituto Metropolitano de Planificación (2014), Ministerio de Medio Ambiente (2012), Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2012 y 2017), Vera, Paredes y Defilippi (2013) y Yamujar (2006).

la Colonia como la capital del Virreinato del Perú, el más importante, conventual³⁶ y religioso de Suramérica, y se le otorgó el apelativo de “mejor fruto de española empresa” (Lope de Vega, 1631, Códice Daza). Su riqueza, posición estratégica y valía geopolítica, aunadas al asedio de los holandeses (1624), corsarios ingleses y pueblos originarios, provocaron su encerramiento (1687) con una muralla³⁷ de once kilómetros y medio de perímetro (Orrego, 2013).

Después del terremoto de 1746 —que dejó más de mil muertos y muy pocas casas en pie—, la ciudad vivió una renovación urbana con la construcción de alamedas, paseos, la iluminación de calles, la reorganización de barrios y el reforzamiento estructural de edificaciones icónicas y templos, que reflejó así la cosmovisión española de ser imperio, cabeza de reino, emporio económico y espacio sagrado (Cobo, 1882; Orrego, 2013, p. 45; Ramón, 1999).

Con posterioridad a la emancipación de 1821, Lima continuó siendo atractor del modelo urbano al ser designada como capital de la República del Perú, consolidando redes territoriales de poder y producción con los asentamientos continentales y ciudades de ultramar, gracias al puerto y el ferrocarril del Callao (1851), época decimonónica durante la cual la infraestructura fue afectada por la invasión de tropas chilenas (1881-1883) —que llegaron hasta la Plaza Mayor— y el asalto de las huestes del caudillo Nicolás de Piérola en la guerra civil de 1895 (Günter y Lohmann, 1992; Orrego, 2013).

Durante el siglo XX, la ciudad adquirió una nueva fisonomía: la apertura de grandes avenidas, la construcción de nuevos y monumentales edificios, el trazado sanitario y el tranvía fueron íconos de modernidad. Por su parte, la demolición de la muralla que cercó el asentamiento durante doscientos años y el desdén de la élite limeña por la ciudad antigua promovieron que el área construida se duplicara. Al tratar de imitar la vida norteamericana y europea, se promovió una vida extraurbana en contacto con la naturaleza, cuyo

36 Durante el esplendor virreinal, el número de órdenes masculinas y femeninas determinó que casi un tercio de la población limeña fuera de vida consagrada, monástica o de servicio a las comunidades religiosas (San Cristobal, 2011).

37 Juan Luis Orrego (2013) considera que la muralla, obra que murió virgen de pólvora y cuya construcción inició en 1684, fue un instrumento para controlar la vida económica y social de la capital del virreinato.

efecto definitivo fue una gran expansión dominada por conos de pobreza y pobreza extrema que contrastaron con zonas de excepcionales condiciones de vida (Flores, 2005; Gamarra, 2010; Mejía, 2013).

Con el gobierno revolucionario de las fuerzas armadas (1968-1980) y la posterior democracia bajo el terrorismo, la ciudad afrontó una grave crisis en su vida republicana que exacerbó la construcción informal en la periferia y la tugurización del centro de la ciudad, el cual logró recuperarse solo a finales del siglo XX (Matos, 1984 y 2012). Para el siglo XXI, Lima y su área metropolitana³⁸ han experimentado un crecimiento urbano, cultural, social, económico y simbiótico entre lo moderno e informal que podría definirse como explosivo, disperso y espontáneo (tabla 2e) y que trata de asumir los retos de la integración regional en situaciones de enorme volatilidad económica y las amenazas del cambio climático (Kahatt, 2014, p. 43; MML, 2013).

Por último, Lima —que alberga casi ocho millones seiscientos mil almas— se comporta en la actualidad como una sola ciudad interdependiente con la colindante municipalidad provincial del Callao, lo que la convierte en una gran zona metropolitana con al menos ciento treinta kilómetros de línea costera (MML, 2013).

2.6.5. Ciudad de México

Al hablar de Ciudad de México como asentamiento humano, deben considerarse dos grandes momentos. El primero corresponde a la fundación azteca de México-Tenochtitlán durante el siglo XIV, que gracias a las chinampas, a la vocación constructora e hidráulica de este pueblo originario y al enorme tributo pagado por los pueblos sometidos, alcanzó un área aproximada de veintiún kilómetros cuadrados sobre el medio léntico de Texcoco y una población superior a muchas de las grandes ciudades europeas de la época (Blasco, 2015; Ezcurra, 2001; INAH, 2018; Jiménez, 1985).

El segundo momento inició el 13 de agosto de 1521, al fundarse el Ayuntamiento de México, después de la conquista por parte de Hernán Cortés, en virtud de sus maniobras políticas, del corte del suministro de agua dulce proveniente de Chapultepec, de la rotura de diques para el paso y uso bélico de bergantines, del obrar de

³⁸ Constituida por la Gran Lima: norte, este, sur, centro y el Callao.

tropas expedicionarias y de la alianza con los señoríos tlaxcaltecas, visión española del asentamiento humano que destruyó templos, desconoció la ingeniería indígena —principalmente hidráulica— y desmontó los servicios de saneamiento y alumbrado que existían (Garay, 1888; García, 2016).

Además, como consecuencia de la incomprensión y desconocimiento del funcionamiento del sistema de aguas de Tenochtitlán, la imposición de la lógica española de ciudad seca, el temor de los miasmas y humores procedentes de las zonas de inundación, las necesidades de aumentar la extensión de tierra fértil y la propiedad y al mal recuerdo de la letal experiencia con los cuerpos de agua durante la guerra de la Conquista, la ciudad y su entorno fueron desecados. Proceso concomitante con el desagüe del valle de México durante los siglos XVII al XIX, en el cual destacó el infame tajo de Nochistongo, que “costó la vida a miles de indígenas explotados [...] perdurando como un ejemplo de los logros que los primeros españoles alcanzaron con sus esclavos” (Simpich, 1930, p. 10).

Durante este periodo colonial, la ciudad fue intervenida bajo el criterio urbanista español para recuperar su infraestructura, principalmente con el aumento en la cobertura del suministro de agua potable y para riego, con el empedrado e iluminación de las principales calles y la recuperación de edificaciones, entre otras obras de embellecimiento, acciones que no alcanzaron la gloria de Tenochtitlán antes del asedio español (Boyer, 1973; Gallardo, 2017; Mejía, 2013; Mundy, 2015).

Una vez firmados los Tratados de Córdoba (24 de agosto de 1821), con los que se reconoció a México como nación independiente y en virtud de la Constitución Federal de los Estados Unidos Mexicanos (1824), la ciudad fue elegida como residencia de los poderes ejecutivo, legislativo y judicial de la Federación, encargo que fluctuó por los actos administrativos ocurridos entre 1836 a 1970 (Gobierno de la Ciudad de México, 2018; Inafed, 2018; Zoraida, 2016).

Durante el extenso periodo de disturbio social y constitucional de la independencia y la consolidación del Estado Federal, acaecido entre 1821 y 1876, la ciudad siguió desecando sus cuerpos de agua y fue creciendo en población y área construida, hasta que presentó una disrupción agrícola e industrial durante la guerra con los Esta-

dos Unidos de América³⁹ y la subsiguiente ocupación de las tropas norteamericanas en septiembre de 1847 (Galeana, 2006; MNH Castillo Chapultepec, 2018). Después, durante la segunda ocupación francesa, que ocasionó la huida del presidente Benito Juárez y su gabinete y la instalación del gobierno del emperador Maximiliano (1862 a 1867), la ciudad mejoró su infraestructura urbana y trazado, “[...] se alinearon las calles, apareció el gran paseo del Imperio [Reforma] y se renovó el Castillo de Chapultepec” (Zoraida, 2016, p. 177), entre otras obras.

Con posterioridad y bajo el positivismo, la pacificación y posterior represión del Porfiriato (1876-1911), se consolidaron las líneas férreas desde la ciudad y hacia la ciudad, lo cual mejoró su conectividad; así mismo, se mejoraron los medios de comunicación en su interior y con otras regiones gracias a la masificación del telégrafo y las líneas telefónicas. De igual manera, se recuperó el aparato industrial y se desarrolló aún más el paseo Reforma y otras vías urbanas con fundamento en un esquema de planificación moderna de ciudad (Krauze, 1987; Speckman, 2016). En este periodo se concluyó el Gran Canal de Desagüe (1900), que con sus 48 km de longitud controló parcialmente las aguas residuales y mantuvo al lago de Texcoco en niveles seguros (Simpich, 1930).

Como consecuencia de la secuela del Porfiriato y el choque de ideologías anarquistas, liberales y conservadoras, reflejadas inicialmente en las críticas e ideales de los hermanos Jesús y Ricardo Flores Magón y las rebeliones de los beneficiarios porfiristas —Bernardo Reyes y Félix Díaz— y de los antiporfiristas —Emiliano Zapata y Pascual Orozco— durante el gobierno de Francisco I Madero (1911-1913), entre otras razones, comenzó la Revolución Social. Este levantamiento se atizó con las posteriores rebeliones lideradas por Venustiano Carranza (Coahuila), Álvaro Obregón (Sonora), Doroteo Arango “Pancho Villa” (Chihuahua) y Emiliano Zapata (Morelos) durante el gobierno de Victoriano Huerta (1913-1914) y la Guerra de Facciones entre los constitucionalistas, villistas y zapatistas (1915). Fue un periodo de inestabilidad en el cual la ciudad acumuló bienes de capital gracias a la violencia creciente en las regiones y a la amenaza de expro-

39 Esta guerra la declaró el presidente norteamericano James Polk el 12 de mayo de 1846 y finalizó con la firma del Tratado de Paz en la Villa de Guadalupe el 2 de febrero de 1848 (Zoraida, 2016).

piación del campo; sin embargo, tal acaparamiento no compensó el declive del PIB regional ni nacional, ni los daños a la infraestructura cada vez que una fracción revolucionaria tomaba a sangre y fuego la ciudad (Garciadiego, 2016; Hansen, 1971; Library of Congress, 2018; Womack, 2012).

Para la mitad del siglo XX, la ciudad experimentó un significativo crecimiento demográfico que se acompañó de la desigual construcción de conjuntos habitacionales, equipamiento en salud, educación, deporte e infraestructura en vías. Tal asimetría de crecimiento, junto con la conurbación y el ensanchamiento de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) en zonas agrícolas, provocó una significativa carencia de suelo, vivienda popular y servicios básicos que a su vez desencadenó la conformación de movimientos urbanos populares (MUP), organizaciones civiles con personería jurídica que exigían una política gubernamental para solucionar el déficit y a la vez defendían los asentamientos irregulares que existían (Alfaro y Ochoa, 2013; Pradilla y Moreno, 2015).

Después del sismo de 1985 —cuya magnitud fue de 8,1 grados en la escala de Richter—, la demanda de vivienda aumentó y, a causa del problema del suelo fangoso del centro de la ciudad, la periferia se explayó aún más. Esta catástrofe demostró la inconveniencia de asentar el proyecto urbano en terrenos sustraídos artificialmente al lago de Texcoco (Ducci, 1986).

A principios del siglo XXI, las políticas neoliberales adoptadas desde las décadas de los ochenta y noventa indujeron a una transformación paulatina de la base económica de la ciudad, que pasó de una economía industrial a una comercial y de servicios (tabla 3f), fenómeno de desindustrialización que generó la pérdida de empleos y la desigualdad social (Pradilla *et al.*, 2016; Pradilla y Moreno, 2015). En este momento la ciudad configuró cuatro grandes espacios urbanos: 1) el negociado, suscitado desde la informalidad; 2) el disputado, conformado por áreas de alto valor histórico y patrimonial; 3) el ancestral, reflejado por pueblos con marcadas tradiciones y ritualidad y 4) el insular, conjunto de lugares desarticulados, segregados y provistos de dispositivos de restricción del paso (Duhau y Giglia, 2008).

En la actualidad, Ciudad de México se mantiene como un proyecto neoliberal, en el que el capitalismo —soportado por una gran carga

Tabla 2f. Información de los principales flujos de materia y energía para Ciudad de México, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025

México																
Año	POBLACIÓN	PBI	AGUA				ENERGÍA Eléctrica	COMBUSTIBLES			ALIMENTOS		BASURAS		GEI	
			DIST	CONFAC	PERD	VERT		GN	Gasolina	Fuel Oil	FRU/VEG/CARN	Bebidas	t/día	t/año		kt CO ₂ /Eq
2000	8.605.239	177.429	63,1	35,4	43,9	27,7	44,4	13.000	1.679	5.635	4.401	N.D.	N.D.	11.674	4.261.010	17.218
2005	8.720.916	172.248	24,6	14,7	40,0	9,8	23,9	13.366	1.933	7.045	5.324	N.D.	6.786.000	11.781	4.300.065	17.383
2010	8.851.080	164.630	22,5	13,4	40,3	9,0	21,9	13.287	1.414	8.454	6.247	6.493	6.330.000	12.055	4.400.075	17.640
2015	8.918.653	134.591	31,4	20,4	35,0	11,0	22,5	14.308	2.834	9.863	7.170	7.336	8.054.000	16.486	6.017.390	27.780
2025	9.139.026	110.884	36,4	24,7	30,4	11,7	23,8	14.968	3.232	12.682	9.016	9.022	8.953.909	18.789	6.858.031	32.664

Fuente: elaboración propia con información de Alfaro y Ochoa (2013), Aguirre (2014), ASA (2016), Ávila (2010), Chapa *et al.* (2015), Conagua (2013), De la Peña (2013), Delgado (2015), Delgado *et al.* (2012), Delgado *et al.* (2017), Gallardo (2017), Gobierno de la Ciudad de México (2018), Haydea (2001), Ibarra *et al.* (2009), Inafed (2018), Inegi (2018), Pradilla (2015), Pradilla *et al.* (2016), Ramos (2015), Sánchez *et al.* (2011), Sedema (2014), Serna *et al.* (2014), Sener (2002, 2015), Sedeco (2018), Torres (2017).

de impuestos— se reproduce de manera incesante, sobre todo por el fomento de las inversiones inmobiliarias privadas, la concesión de ejes viales, la transferencia de funciones del Gobierno al sector privado y el control que este ejerce sobre los espacios públicos. La ciudad capital, con una enorme desigualdad social, sufre de un grave deterioro ambiental tanto en el aire como en el agua, el suelo y la biota y naturalmente, problemas en la gestión y acceso al vital líquido (tabla 2f) (Aguirre, 2014; Arteaga, 2015; Díaz 2006; Ornelas, 2015; Pradilla y Moreno, 2015). La ciudad es, en palabras de Gallo (2005) y de muchos de sus habitantes y visitantes, “un monstruo, un desastre urbano, una pesadilla posmoderna [...] con un sinnúmero de atractivos culturales y artísticos” (p. 13).

Por último, la ciudad —con cerca de nueve millones doscientos mil habitantes— sigue gestionando el agua de una manera ajena a la historia y realidad hídrica e hidrogeológica del valle de México: se inunda en cualquier momento de precipitación por culpa de la escasa regulación natural de la esorrentía y la mínima infiltración. Así mismo, sufre por el abastecimiento y lleva al límite el sistema Cutzamala, mientras afloran a diario conflictos por el acceso y uso en una situación de creciente contaminación. Todo un galimatías ambiental y de saneamiento que se espera resolver, de forma parcial, con el Programa de Sustentabilidad y Gestión de los Servicios Hídricos (PSGSH) (CDMX, 2016).

2.6.6. Santiago

A los pies del cerro Santa Lucía (otrora cerro Huelén) existía, al momento de la Conquista, un asentamiento humano mapocho incaico que contaba con una infraestructura básica representada en calzadas, canales, acequias, centros ceremoniales, viviendas, chagras, cementerios y tierras cultivables, el cual sirvió como base de instalación para el proyecto urbano europeo de Santiago, que no se desarrolló de forma significativa durante los dos primeros siglos de existencia. Este poblado español no se logró consolidar hasta la segunda mitad del siglo XVIII, con la renovación fisionómica de hospitales, casas consistoriales, palacios, iglesias, basílicas y la Catedral Metropolitana, y con obras de infraestructura, tendido de redes hidráulicas y la construcción de los tajamares del río Mapocho (Stehberg y Sotomayor, 2013).

Tabla 2g. Información de los principales flujos de materia y energía para Santiago de Chile Ciudad, para los años 2000, 2005, 2010 y proyección a 2025

Santiago de Chile															
Año	POBLACIÓN	PBI MM USD	AGUA				ENERGÍA Eléctrica GWh	COMBUSTIBLES			ALIMENTOS		BASURAS		GEI kt CO ₂ Eq
			DIST m³/s	CONFAC m³/s	PERD %	VERT m³/s		GN kt/año	Gasolina kt/año	Fuel Oil kt/año	FRU/VER/CARN kt/año	Bebidas m³/año	t/día	t/año	
2000	4.840.881	35.810	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10.670	N.D.	N.D.	N.D.	2.478	839.893	6.575	2.399.875	15.000
2005	4.976.208	47.494	26,8	16,9	37	9,9	N.D.	549,4	1.088	1.165	2.646	N.D	N.D.	N.D.	16.000
2010	5.232.175	61.603	26,3	16,8	36	9,5	N.D.	621,4	1.122	1.414	2.902	1.232.192	7.691	2.807.215	17.500
2015	5.314.176	93.428	27,9	19,5	30	8,4	16,87	11.869	678,7	1.292	1.331	3.102	N.D	3.928.860	19.000
2025	5.668.810	136.370	28,7	21,7	23,8	6,9	18,87	15.764	810	1.473	1.553	3.567	1.724.491	6.172.150	22.000

Fuente: elaboración propia con información de Banco Central de Chile (2016), Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC) SIC (2015), Comisión Nacional de Energía (2018), Comisión Nacional de Medio Ambiente (2010), Durán (2015), Instituto Nacional de Estadística (INE) (2003, 2016a, 2016b, 2018), Metrogás (2005), Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa) (2012), Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SNICHile) (2018), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) (2018), Tapia (2012) y Zurita (2007).

Para el momento de la emancipación (1810), la ciudad se convirtió en la capital de la República de Chile, lo que aceleró su crecimiento económico y urbanístico sostenido hasta finales del siglo XX, el cual superaría en corto tiempo sus tradicionales límites naturales: el río Mapocho, el cerro Santa Lucía y las cañadas. Este fenómeno sustrajo las áreas agrícolas aledañas para la construcción de suburbios, industrias y áreas de esparcimiento, las cuales se interconectaron por ejes vehiculares concéntricos que mitigaron de manera parcial los problemas de movilidad con un trazado que acercó la centralidad a los extremos y el conurbano (De Ramón, 1992; Mejía, 2013).

Sin embargo, este proceso de modernización urbana tuvo un alto costo social al desarrollarse bajo la lógica de la represión, que empezó con la Semana Roja (octubre de 1905) y terminó con la dictadura de Augusto Pinochet (1973-1990) (Grez, 2006; Romero, 2007).

Durante la autoridad militar, la capital fue el enclave y expresión del experimento latinoamericano neoliberal y de la arrogancia crematística de los Chicago Boys, que produjo, de 1974 a 1982, un alto índice de desempleo, la disminución de salarios, la quiebra de numerosas empresas y la inflación acelerada, crisis que fue “subsanaada” en 1985 con la masiva privatización de las empresas estatales y servicios sociales.

Para finales del siglo XX, la flexibilización de las políticas económicas, las reformas comerciales y la política fiscal determinaron que la ciudad y el país fueran referente para la banca multilateral y el Foro Económico Mundial: Santiago se consolidó como urbe competitiva latinoamericana y global (BND, 2018; WEF, 2017) (tabla 2g), logro que se alcanzó a costa de toda clase de violaciones a los derechos humanos, represión, silencio y coerción (Bonnefoy, 2016; Hilbink, 2007).

Santiago hoy refleja por completo el modelo neoliberal y privatizador de la economía, que espacialmente ha marcado un proceso de estratificación social en la ciudad, definido por un centro que concentra al máximo el capital, en contraste con los barrios de la periferia, que se deterioran al asumir funciones de soporte y servicio. Esta relación urbano-regional entre la Comuna de Santiago, la Conurbación, el Área Metropolitana de Santiago y la Región Metropolitana es bien definida por la municipalidad: “se vive en la periferia, pero

se trabaja, se toman decisiones, se negocia, se estudia, se compra y se recrea en el centro” (Municipalidad de Santiago, 2018, p. 9).

Por contera, ante el libre mercado, la alta carga impositiva y la privatización, gran parte de los 6,2 millones de habitantes son presa de un sistema de ahorro forzoso en fondos de pensiones privados y un *apartheid educativo* que les provee servicios públicos y sanitarios concesionados, sobre todo el agua, a precios onerosos (Molina, 2013; Torres *et al.*, 2017), lo que ahora aflora en un masivo descontento social.

2.7. El metabolismo en cifras

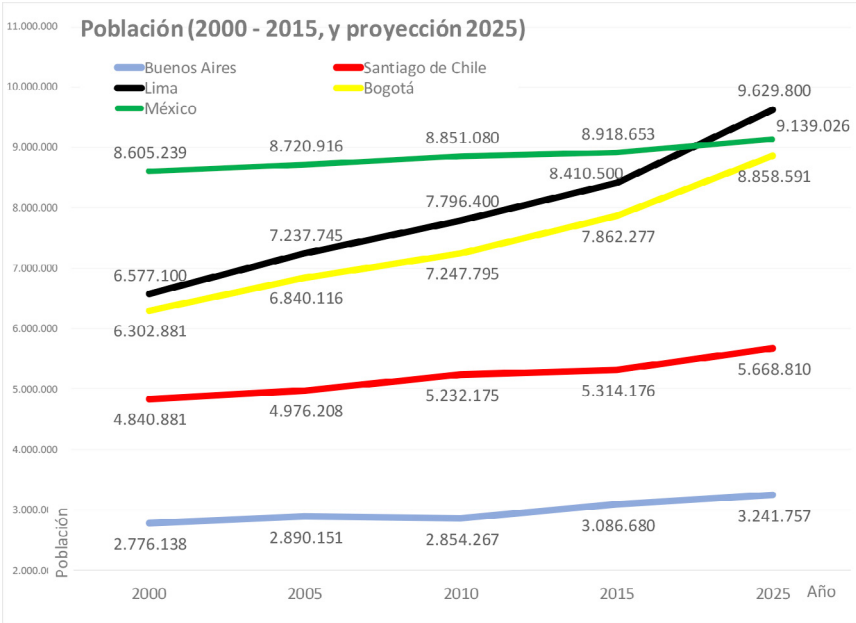
Tras dos siglos de vida emancipada y más de cuatrocientos cincuenta años de existencia, el modelo europeo español (Bogotá, Ciudad de México, Lima y Santiago) y el francés (Buenos Aires Ciudad) de las ciudades capitales latinoamericanas son orgullo de los Estados que estas representan. Su *statu quo* —históricamente construido— ha motivado un anhelo de vida urbana en la población, no solo como opción de oportunidades, sino como alternativa para la subsistencia, proyecto que se sustenta en la utopía gubernamental de consolidar una máquina/creación de movimiento perpetuo (Agulles, 2017).

Esta existencia urbana a continuación se analizará en términos metabólicos, propiamente en entradas de agua (distribución y consumo facturado), alimentos, bebidas y agua embotellada, combustibles fósiles (gasolina, diésel y gas natural) y energía eléctrica —que son los flujos básicos que sustentan un asentamiento— y las principales salidas con connotación ambiental urbana: emisiones de gases efecto invernadero, basuras, pérdidas de agua potable y vertimientos, para presentar un análisis de flujos de materiales y energía en un contexto poblacional y económico.

2.7.1. Población

El crecimiento poblacional en las ciudades capitales está influido casi siempre por migración más que por crecimiento vegetativo. Caso representativo de este comportamiento son Lima y Bogotá, las cuales han sido las principales receptoras de población desplazada por la violencia y falta de oportunidades en sus respectivos países (figura 2c).

Figura 2c. Comportamiento de la población en las ciudades de Bogotá, Buenos Aires, Lima y Santiago. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

Por su parte, Santiago y Buenos Aires Ciudad han tenido un crecimiento moderado de su población, comportamiento que se prevé mantener en el corto y el medio plazo, mientras que Ciudad de México experimenta un estancamiento, motivado por el incremento en el costo de vida y el valor de la vivienda, además de la pérdida de calidad de vida por la contaminación creciente y el tráfico urbano.

El crecimiento de población en todo el conurbano es preocupante, más aún si se consideran los anhelos de los gobiernos municipales, de provincia y departamentales por consolidar estructuras administrativas tipo ciudad-región, con una lógica de economías de aglomeración que aparentemente incrementan la competitividad, expanden el tamaño del mercado y atraen capital y fuerza de trabajo (Saito, 2018).

Por tal motivo, es importante advertir que los procesos de metropolización de estos centros urbanos son totalmente desproporcionados,

al no considerar real la capacidad de administración municipal, los recursos disponibles, la capacidad de amortiguamiento de los sistemas naturales en su interior y alrededores y la disponibilidad de agua.

2.7.2. *Producto interno bruto*

En cuanto al valor monetario de la producción anual de bienes y servicios, se puede inferir que estas ciudades capitales han tenido un buen comportamiento económico —netamente crematístico— durante el siglo XXI (figura 2d), el cual les ha permitido convertirse en una de las principales economías regionales en sus respectivos países. Esta participación nacional se soporta en nodos de conexión y red de carreteras, vías férreas, aeropuertos internacionales, puertos (cuando aplica) y conectividad a internet de alta velocidad y también por la concentración de los poderes ejecutivo, legislativo y judicial y el predominio de actores económicos de mayor rédito y generación de renta.

De este modo, se aprecia un marcado crecimiento del PIB⁴⁰ en Bogotá, Lima, Santiago de Chile y Buenos Aires, ciudad esta que entre los años 2005 y 2015 casi cuadruplicó el valor monetario de todos los bienes y servicios producidos. Como excepción al comportamiento en América Latina, Ciudad de México presentó hasta el año 2015 un decrecimiento en su PIB, sobre todo por el efecto perverso del modelo neoliberal y la crisis económica que en su momento afectó a la región.

Para 2025 se espera que la contribución de los sectores financiero, inmobiliario, servicios y empresarial de Buenos Aires, Bogotá, Ciudad de México, Lima y Santiago se mantenga, y que jalone la economía regional, siempre y cuando las condiciones macroeconómicas lo permitan, se habiliten nuevos ciclos hipotecarios y se sigan realizando grandes esfuerzos termodinámicos desde su interior y los alrededores para mantenerlos operando. También será necesario continuar disipando enormes cantidades de formas de materia y energía no útil y exigir a la población vivir a una vertiginosa velocidad, acciones que a duras penas les permitirán a estos sistemas complejos mantenerse en

40 Es importante aclarar que el crecimiento económico en estas ciudades no ha logrado una redistribución de la riqueza en la población, razón por la cual aún son las que concentran más riqueza y, concomitantemente, las que presentan más desigualdades.

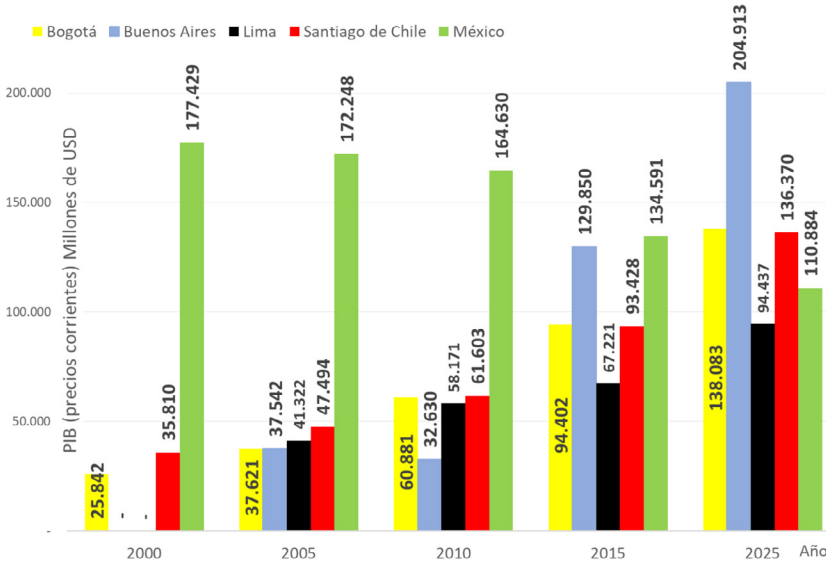
la misma posición relativa con respecto al país y la región, tal como lo presagió Lewis Mumford en 1961 en su libro *La ciudad en la historia*.

2.7.3. Consumo y pérdidas de agua

En cuanto al vital líquido se refiere, las ciudades capitales realizan ingentes esfuerzos en cinco grandes frentes de trabajo: 1) preservar las actuales áreas naturales de abasto; 2) habilitar nuevas fuentes bajo un esquema de suministro distribuido entre la ciudad y el conurbano; 3) mantener la cobertura ante el crecimiento formal e informal de la ciudad; 4) reducir las pérdidas técnicas por conducción en tubería y las acometidas clandestinas (figura 2e), consideradas como agua no contabilizada en el modelo de mercado y 5) mantener una continua campaña de sensibilización y educación ambiental para evitar el desperdicio en los sectores usuarios.

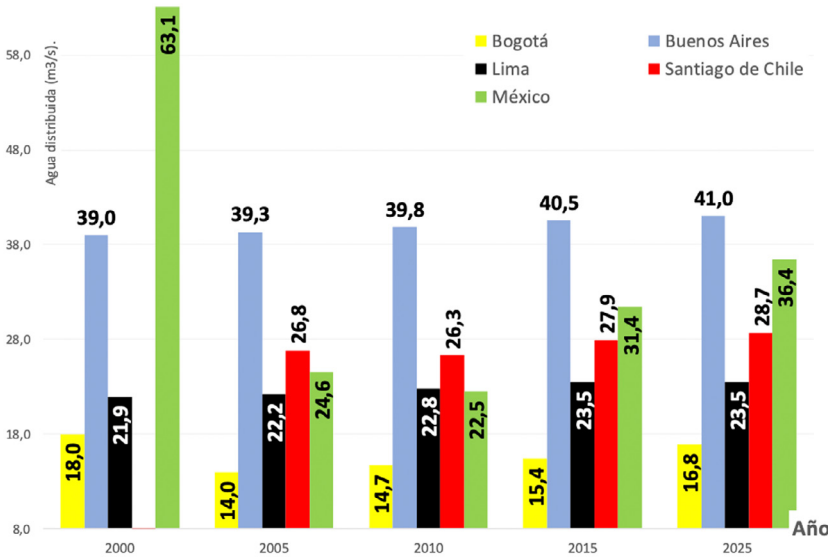
Estas acciones —aunadas a la acción tarifaria— han permitido que el consumo no haya crecido de forma significativa en Bogotá,

Figura 2c. Comportamiento del PIB de las ciudades capitales en el periodo 2000-2015, con proyección a 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

Figura 2e. Comparativo del consumo de agua (distribución, m³/s) para las ciudades objeto de estudio. Período 2000-2015 y proyección 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

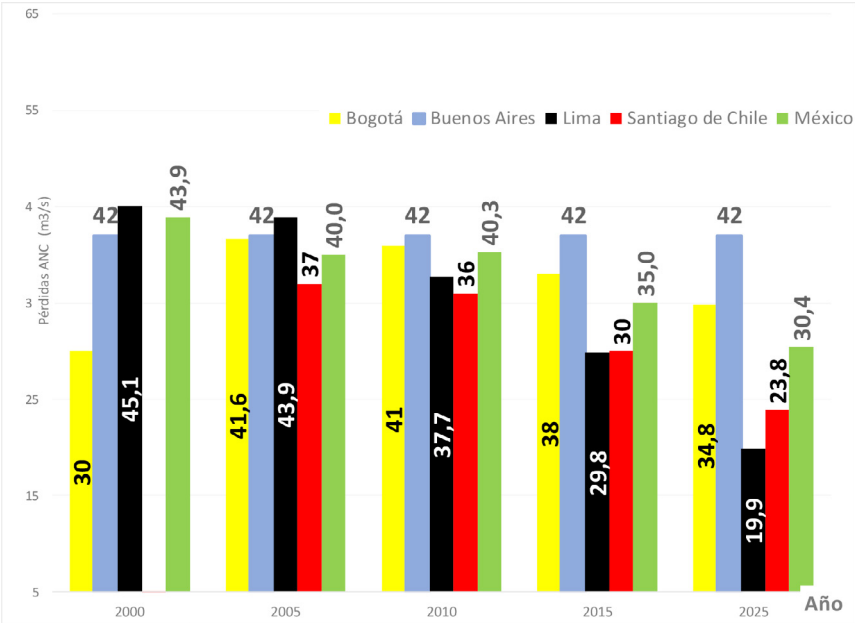
Lima, Buenos Aires Ciudad y Santiago (figura 2d). Es llamativo el caso de la capital colombiana, donde se logró reducir —a principios del siglo XXI— la distribución de agua en un 40 %, al convertir una crisis de abastecimiento⁴¹ en una oportunidad para concienciar a la población y reformular el esquema de cobros que existía en la operación pública. Un comportamiento distinto presenta Ciudad de México, cuyo consumo ha tenido un crecimiento desde 2005 hasta la fecha, lo cual la convierte en una de las ciudades capitales del mundo con un alto consumo per cápita⁴², que oscila entre 203 y 530 l/hab. día, dependiendo de la delegación⁴³.

41 La crisis principalmente obedeció al derrumbe de los túneles del Sistema Chingaza, principal abastecedor de agua para la capital colombiana.

42 En cuanto al consumo per cápita, vale señalar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un valor promedio de 100 l/hab.día.

43 Según Sedema (2016), el intervalo fue definido por las delegaciones Venustiano Carranza, con un consumo per cápita promedio de 203 l/hab.día, y Tlalpan, con un consumo de 560 l/hab.día.

Figura 2e. Comparativo de las pérdidas la conducción (agua no contabilizada, porcentaje) para las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

Por otro lado, es importante advertir que la gran mayoría del agua que se consume en estas ciudades no se capta superficialmente dentro del perímetro urbano, sino que proviene de áreas de conservación pertenecientes a otras municipalidades o entidades administrativas; así ocurre en Bogotá (sistemas Chingaza, Tibitoc y Tunjuelo), Lima (sistema río Santa Eulalia), Santiago (río Maipo) o de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Río de la Plata y Acuífero Puelche). En este aspecto, Ciudad de México presenta una extraordinaria situación ya que buena parte del agua proviene del sistema Cutzamala y recorre 127 km en una curva de ascenso por bombeo de mil metros aproximadamente (Conagua, 2017).

Para el siglo XXI, las mayores preocupaciones en el suministro del agua para estos leviatanes urbanos son: 1) reducir las pérdidas técnicas y por hurto, que hoy alcanzan valores del 30% al 40% en los sistemas de conducción, lo que representa volúmenes de entre 5

y 17 m³/s, que podrían destinarse a otros usos o a suplir las necesidades de poblaciones aledañas enteras (figura 2e); 2) la conservación de las actuales fuentes de abastecimiento y la habilitación de otras para atender de forma gradual la demanda, en momentos en que se presentan drásticas variaciones en los regímenes de lluvia y se reducen los glaciales en alta montaña y 3) la urgente atención de los crecientes conflictos ambientales y sociales por acceso al agua y su uso, sobre todo entre las poblaciones que habitan las zonas de abasto y provisión y las que son receptoras de las aguas contaminadas.

2.7.4. Consumo de energía eléctrica y combustibles

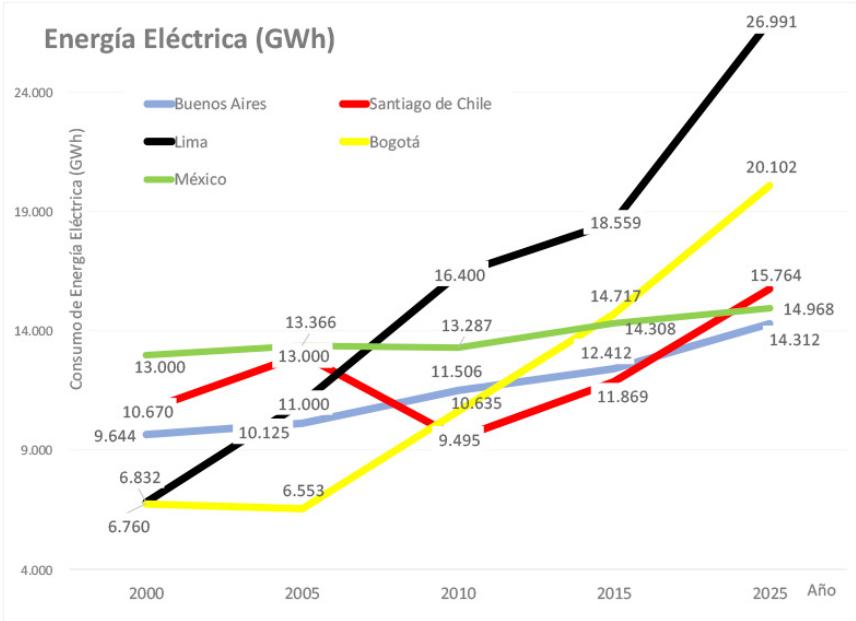
Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Lima, Ciudad de México y Santiago son sistemas complejos “devoradores” de energía eléctrica (figura 2f) y de combustibles fósiles (figuras 2g y 2h), comportamiento atribuido a la adicción tecnológica de sus habitantes, al dinamismo de sus economías, al modelo de consumo desmedido impulsado por la lógica del mercado neoliberal y global, a la expansión urbana, al tamaño creciente de su parque automotor y al incremental número de viajes y desplazamientos de sus habitantes, principalmente.

Así, en tan solo quince años, ciudades como Lima y Bogotá han triplicado su consumo de energía eléctrica, mientras que Santiago lo ha duplicado, Buenos Aires Ciudad ha tenido un aumento del 50 % y Ciudad de México ha tratado de estabilizarlo (figura 2f). Para 2025 se prevé que el consumo de energía siga en aumento, siendo más evidente —por la tendencia actual— en Lima, Santiago y Bogotá.

En cuanto a combustibles fósiles, propiamente gasolina, la mayoría de las ciudades presentan un crecimiento sostenido durante el periodo de estudio, a saber: Buenos Aires Ciudad y Lima duplicaron el consumo, Santiago de Chile lo aumentó en un 18 %, mientras que Ciudad de México⁴⁴ presentó un incremento del 75 %. Por su parte, Bogotá mantuvo un comportamiento estable entre los años 2000 a 2015 (figura 2g). Para 2025 se espera un incremento en el consumo en todas las ciudades capitales, en virtud del aumento del parque automotor de vehículos con motores de combustión interna de ignición.

44 Nótese el orden de magnitud que presenta Ciudad de México (2015) con respecto a las otras ciudades capitales: 15 veces más que el consumo de Buenos Aires Ciudad y Bogotá, 7 veces más que Santiago de Chile y 13 veces el consumo de Lima.

Figura 2f. Comportamiento en el consumo de energía eléctrica (GWh) de las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025

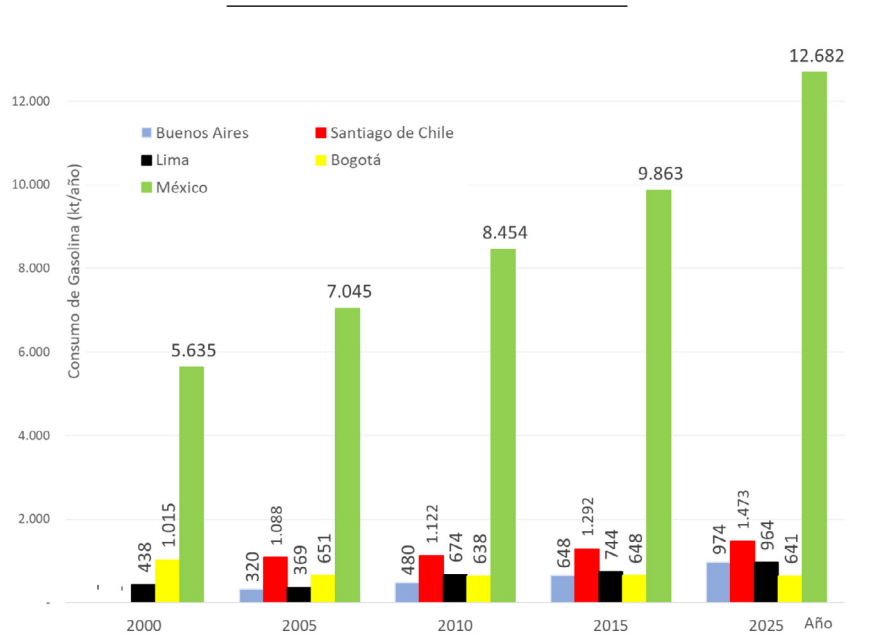


Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

Respecto a *fuel oil* n.º 2 o diésel, el comportamiento en el incremento se evidenció en las ciudades de Bogotá, Lima, Santiago y Ciudad de México, que tuvieron un aumento del 73 %, 103 %, 14 % y del 62 %, respectivamente, el cual se atribuye al aumento del parque automotor privado con motores de combustión interna por compresión y al incremento de la flota de vehículos de trabajo pesado para transporte de mercancías y pasajeros. Por su parte, Buenos Aires Ciudad tuvo una estabilización en el consumo (figura 2h). Para 2025 se espera que el diésel⁴⁵ se mantenga dentro del portafolio energético de las ciudades con una tendencia al alza en su demanda.

⁴⁵ En cuanto al consumo de diésel (2015), se mantiene la diferencia entre Ciudad de México y las demás ciudades capitales, a saber: 29 veces el consumo de Buenos Aires Ciudad, 5 veces el de Santiago, 3 veces mayor que el de Lima y 10 veces el de Bogotá.

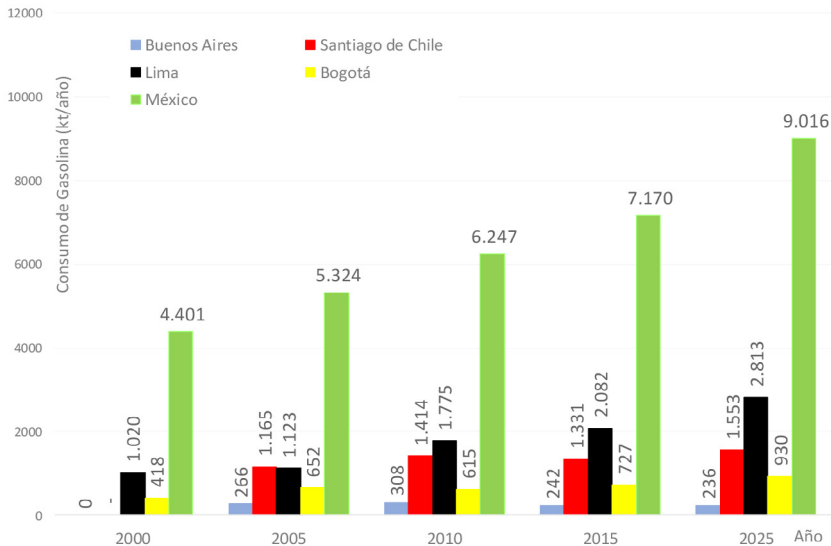
Figura 2g. Comportamiento en el consumo de gasolina (kt/año) de las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

Desde la perspectiva termodinámica, el consumo energético que se acaba de exponer es una expresión del enorme trabajo (W) que estos sistemas capitalinos latinoamericanos realizan a diario para mantener su estado pseudoestable en condiciones muy alejadas del equilibrio, lo que se traduce en una significativa generación de entropía que se expresa en la forma de flujos de materia y energía no útiles (contaminantes), la cual se relocaliza en su interior y alrededores de una manera maquiavélica, con el sacrificio de zonas de bajo valor inmobiliario y la afectación de la población más vulnerable. Esta alta disipación opera bajo una paradoja termodinámica, puesto que por cada unidad de ordenada que se produce en el sistema complejo urbano se genera más desorden que el inicial (Brown *et al.*, 1991).

Figura 2h. Comportamiento en el consumo de “fuel oil” (kt/año) de las ciudades objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

2.7.5. Consumo de alimentos y bebidas

Asegurar un flujo masivo y continuo de alimentos (figura 2i) para la creciente población urbana en Latinoamérica es un gran reto para la supervivencia de la población y la sostenibilidad regional, no solo por la huella ecológica, sino por el impacto ambiental que la agricultura, la ganadería, la pesca a gran escala y la agroindustria generan en sus respectivos contextos. Además, por la premura de salvaguardar la seguridad alimentaria en las zonas productoras, proteger y ampliar las áreas que existen, aumentar la eficiencia en la producción y, naturalmente, reducir las pérdidas durante la cadena de intermediación.

De manera que la presión de una población en aumento, el imaginario de prosperidad por medio del consumo incremental, las pérdidas durante la cadena de suministro y en los hogares y una estructura tipo embudo en el suministro son condiciones que han definido que

el flujo agregado de alimentos haya aumentado de manera considerable en los últimos 15 años en Lima, Bogotá, Santiago y Ciudad de México⁴⁶ (figura 2i). Como excepción al incremento, Buenos Aires Ciudad presentó, durante el periodo 2005 a 2015, una reducción en el consumo del 24 %, atribuido sobre todo a la concienciación ciudadana de los riesgos asociados al consumo de carne roja.

Este aumento en el consumo de alimentos en la mayoría de las ciudades capitales presenta un desafío para el sistema de abasto global, no solo por la exigencia de aumentar la producción inocua, eficiente y de bajo impacto ambiental, sino por la urgente necesidad de cambiar las dietas elevadas en calorías y compartir los alimentos que no cumplen con los estándares del mercado o que están próximos a caducar con la población pobre, en extrema pobreza y el habitante de calle, ya que “no hay alimento feo para el hambre” (Royte, 2016, p. 2). Finalmente, es menester atender el llamado de las Naciones Unidas, mediante su Programa de Alimentos, a reducir el enorme desperdicio en la intermediación, en los puntos de venta y en el hogar (Foley, 2014).

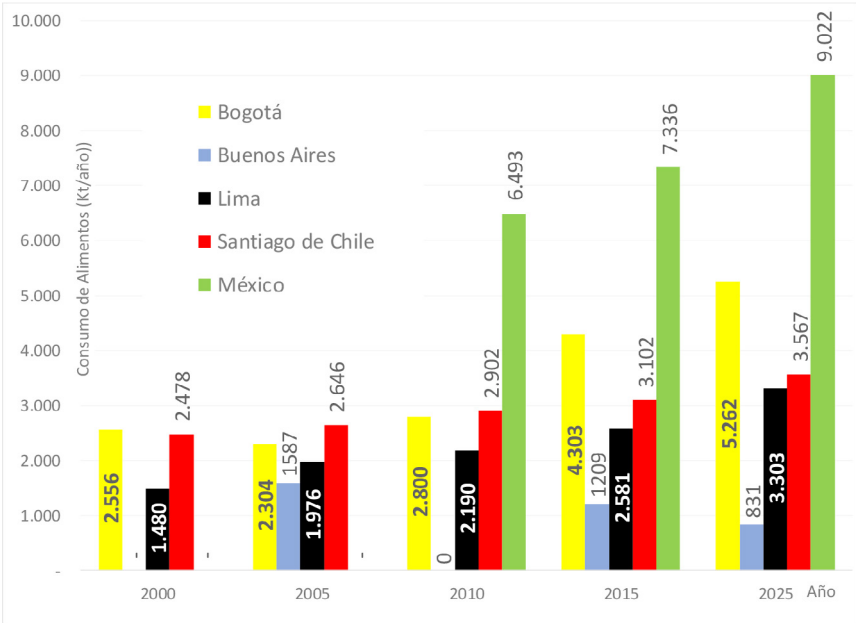
Como complemento dietario, las bebidas azucaradas, el agua embotellada y los licores han ganado terreno en el consumo anual de los habitantes urbanos. A partir de las cifras, puede decirse que en todas las ciudades su consumo es incremental durante el periodo del estudio (2000-2015), razón por la cual, en la proyección se estima que su participación en la dieta capitalina para el año 2025 será mayor, pues sustituirá al agua potable como elemento hidratante (figura 2j).

2.7.6. Basuras producidas

Desde el punto de vista ambiental, la generación de entropía urbana implica varios problemas en las matrices agua, aire, suelo y biota, a saber: 1) el riesgo por desabastecimiento de agua, con las subsecuentes presiones y conflictos por su uso; 2) la contaminación de ríos urbanos y cuerpos de agua lénticos; 3) la pérdida de calidad del aire, principalmente por la presencia de material particulado, ozono

46 En cuanto al consumo de alimentos, Ciudad de México de nuevo se muestra como Leviatán con respecto a sus hermanas ciudades capitales (2015), así: 6 veces el consumo de Buenos Aires Ciudad, 2,4 veces el correspondiente a Santiago, 2,8 veces más que Lima y, 1,7 veces el de Bogotá.

Figura 2i. Consumo de alimentos (kt/año) en las ciudades latinoamericanas objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025



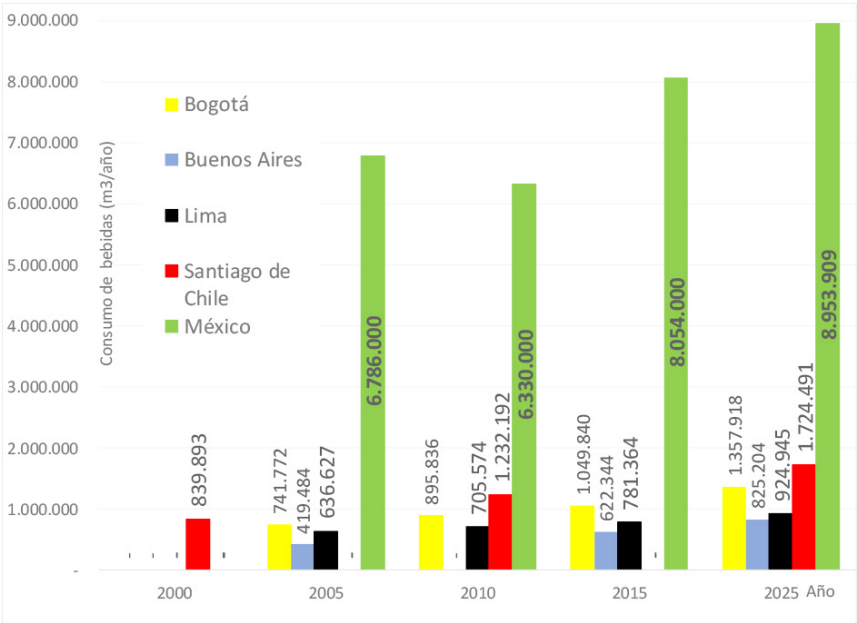
Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

troposférico, monóxido de carbono y metales pesados, entre otras especies químicas; también, por la ocurrencia de fenómenos de precipitación ácida y alcalina; 4) la pérdida y contaminación de suelos agrícolas periurbanos y urbanos; 5) el deterioro de ecosistemas vulnerables —bosques urbanos, humedales, marismas, estuarios, etc.— y de áreas protegidas; así mismo, la pérdida de conectividad ecológica; 6) el incremento del ruido urbano y 7) el ahogo en los propios desperdicios, principalmente las basuras⁴⁷ (figura 2k), entre otros.

En lo que se refiere a los residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o vertederos (figura 2k), se puede decir que Ciudad de Méxi-

⁴⁷ Las basuras son la corriente contaminante más próxima al ciudadano y entendible de este. Por tanto, las acciones encaminadas a reducir la generación de ellas, a mejorar la separación en la fuente y a optimizar las rutas y días de recolección, entre otras, tienden a tener una mayor receptividad.

Figura 2j. Consumo de bebidas ($m^3/año$) en las ciudades latinoamericanas objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

co, Santiago⁴⁸ y Lima han duplicado la cantidad de basuras producidas en tan solo quince años, mientras que en Bogotá el valor aumentó un 58%. Por su parte, Buenos Aires Ciudad muestra una estabilización de las toneladas/día producidas, con un leve crecimiento en el año 2015.

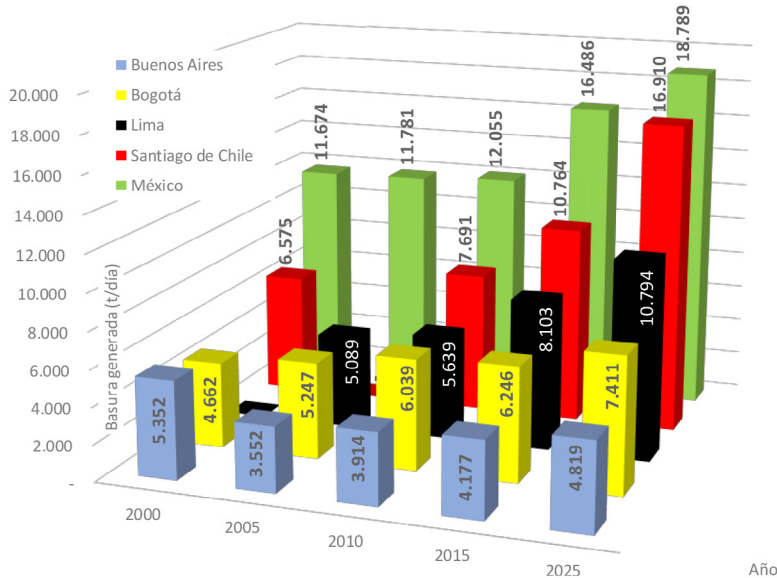
Para el futuro inmediato (2025) se proyecta un crecimiento en la cantidad de basuras producidas por día, con una marcada tendencia en Santiago, Lima y Ciudad de México, mientras que Bogotá y Buenos Aires Ciudad tendrían un leve aumento.

2.7.7. Emisiones de gases efecto invernadero

Las ciudades latinoamericanas, al ser consideradas como motores de prosperidad global en la era urbana del Antropoceno, han he-

48 Diferente de lo observado con otros flujos urbanos, en lo concerniente a las basuras, Santiago y Ciudad de México no difieren significativamente en la cantidad de toneladas diarias generadas. Similitud que será más cercana en la proyección al año 2025.

Figura 2k. Cantidad de basuras producidas (t/día) en las ciudades capitales objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección a 2015



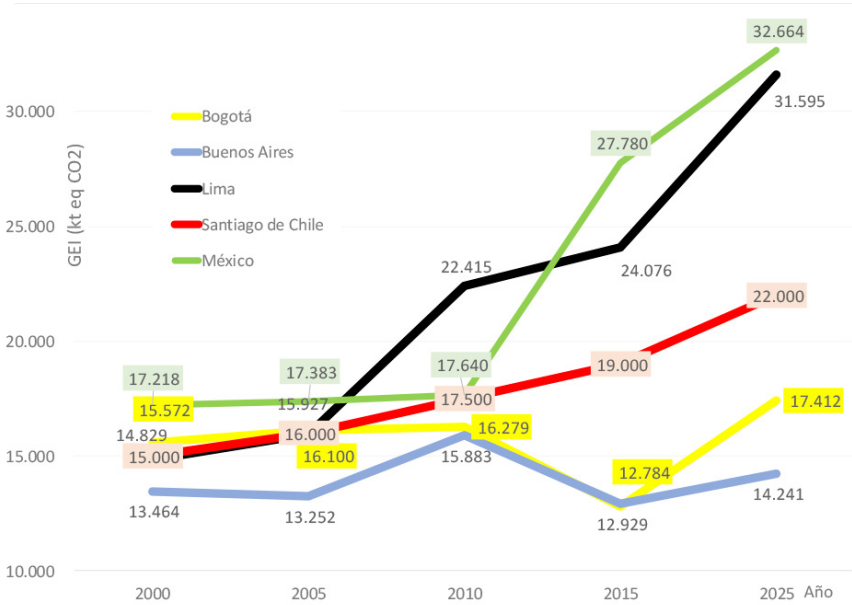
Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

cho posible la consolidación del modelo capitalista y la valoración positiva del sujeto y la vida urbana (Burdett y Rode, 2011; Kunzig, 2011; Mejía, 2013), lo que a su vez le ha conferido la obligación de coadyuvar ostensiblemente a la consolidación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Para cumplir con el compromiso global en situaciones de variabilidad y cambio climático, estos sistemas en economías emergentes deben reconocer su enorme vulnerabilidad, establecer estrategias y adoptar acciones de mitigación, adaptación y compensación de la contaminación. Naturalmente, también están en la obligación de conocer su participación en el aporte de las emisiones de GEI en las respectivas cuentas nacionales (figura 2l), para lo cual es menester efectuar inventarios precisos que consideren todos los sectores aportantes.

En lo que hace al comportamiento de estas emisiones, expresadas como dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq), se aprecia que durante los años 2000 a 2015 las ciudades capitales de América Latina

Figura 2l. Emisiones de gases efecto invernadero (Kt CO₂ eq) en las ciudades latinoamericanas objeto de estudio. Periodo 2000-2015 y proyección 2025



Fuente: elaboración propia con la información del metabolismo urbano de las ciudades capitales, periodos 2000 a 2015.

no coadyuvaban en la reducción acordada en el Protocolo de Kyoto, a saber: Ciudad de México y Lima presentaron un incremento del 61 % y Santiago, un 27 %. Por su parte, Buenos Aires Ciudad reportó un leve decrecimiento de las emisiones (8 %) y Bogotá —aparentemente— disminuyó en un 18 % su aporte GEI, reducción que obedece principalmente al ajuste y perfeccionamiento de los inventarios, más que a una real mitigación.

En el futuro, se espera que las toneladas equivalentes GEI (Kteq CO₂) se mantengan con tendencia al alza, porque dependen sobre todo del número de habitantes, del consumo de energía y combustibles, del número de desplazamientos, de la generación y disposición de basuras y de los cambios en el uso del suelo, para los cuales todas las ciudades capitales del estudio se encuentran en un claro incremento.

2.8. La disipación y el riesgo de colapso

La disipación de entropía de estos sistemas complejos ocasiona desigualdades con las regiones que reciben los desperdicios de la actividad urbana, los cuales —como expresión del metabolismo lineal urbano— son producto de la generación y concentración de la riqueza, la acumulación de capital, el bienestar de algunos y la existencia de todos. Así mismo, deja entrever las inequidades entre los pocos habitantes que logran disfrutar del espejismo urbano y los que a diario se esfuerzan para sobrevivir con salarios próximos al mínimo mensual legal vigente (Díaz, 2012a).

Por tal motivo, los diferenciales de concentración de la materia y la energía de los desechos y de la entropía se mantendrán e incrementarán en el tiempo mientras la ciudad exista, concentre riqueza, dinamice sus factores de crecimiento (capital, fuerza de trabajo, recursos naturales, talento humano y cerebros, entre otros) y se deshaga del desorden que se produce, o lo relocalice. Así las cosas, la desigualdad —como diferencial de valores, características y parámetros— es inevitable en sistemas alejados del equilibrio como las ciudades capitales, más cuando estas se localizan en economías emergentes y países en desarrollo.

Habiendo expuesto la realidad urbana latinoamericana (información consolidada en los mapas 2a a 2d), evidenciado su metabolismo lineal y considerado que los crecientes flujos $M/E/I$ son perturbaciones que continuamente tratan de ser amortiguadas gracias a la acción de la retroalimentación negativa y la homeostasis emergente —a un costo termodinámico que al final de cuentas exacerbará la perturbación—, es menester reiterar que cuando la disipación no sea suficiente para deshacerse de la entropía, el riesgo de colapso urbano empieza a ser probable por causas naturales y antrópicas en condiciones de alta vulnerabilidad y baja adaptabilidad, como ya se mencionó.

Esta situación extrema ya se presentó en sociedades y asentamientos humanos del pasado: 1) por un aparente agotamiento del suelo, la reducción en la oferta de agua y enfermedades (Rapa Nui en la isla de Pascua, en los siglos XVI-XVII); 2) por la deforestación, destrucción del paisaje, la sequía y conflictos políticos (ciudades estado mayas en la península de Yucatán, en el siglo IX); 3) por aparentes cambios

drásticos en los regímenes de lluvia (Harappa, en el valle del Indo, siglo XIV a. de C.) y 4) por crisis políticas y variación en los regímenes hidrológicos que afectaron las áreas de cultivo (Angkor, en la actual Camboya, en el siglo XV), entre otras causas (Coulter, 2009; Gugliotta *et al.*, 2007; Mulrooney, 2013; Preston y McCurry, 2000; Román, 1997; Vance y Coventry, 2016).

Es decir, las fluctuaciones anómalas en los regímenes de lluvia, en las estacionalidades, en la temperatura y la humedad relativa, que de manera progresiva provocaron cambios en los flujos M/E/I, aunadas a un crecimiento demográfico que causó una presión desmedida sobre la infraestructura y capacidad de carga de los sistemas naturales de abasto y provisión, funcionaron como detonantes que desencadenaron un “suicidio ecológico impremeditado” (Diamond, 2006, p. 23), más cuando no se presentaron innovaciones sociales, prevención y atención a desastres, ni tampoco libertad para el quehacer en la vida privada, el entorno social y las relaciones económicas, políticas, sociales y ambientales con otros asentamientos humanos (Castells, 1999; Duhau y Giglia, 2008).

Por tal motivo, queda demostrado que el sistema expansivo urbano presenta dos mecanismos de catástrofe, a saber: uno propio, desarrollado por el actuar del hombre y otro exógeno, producido por sus relaciones de no equilibrio con el contorno y el ambiente natural, los cuales se intensifican cuando ocurren desastres naturales y quedan latentes mientras la naturaleza es benévola al no expresar su máximo poder destructivo (Adams, 2007). En síntesis y en palabras de Rivera (2018): “La especie humana podría ser parte de las nuevas y contemporáneas extinciones [planetarias]” (p. 5).

Ante esta realidad, el saldo histórico latinoamericano tiene visiones encontradas⁴⁹: el optimismo desmedido proveniente de la

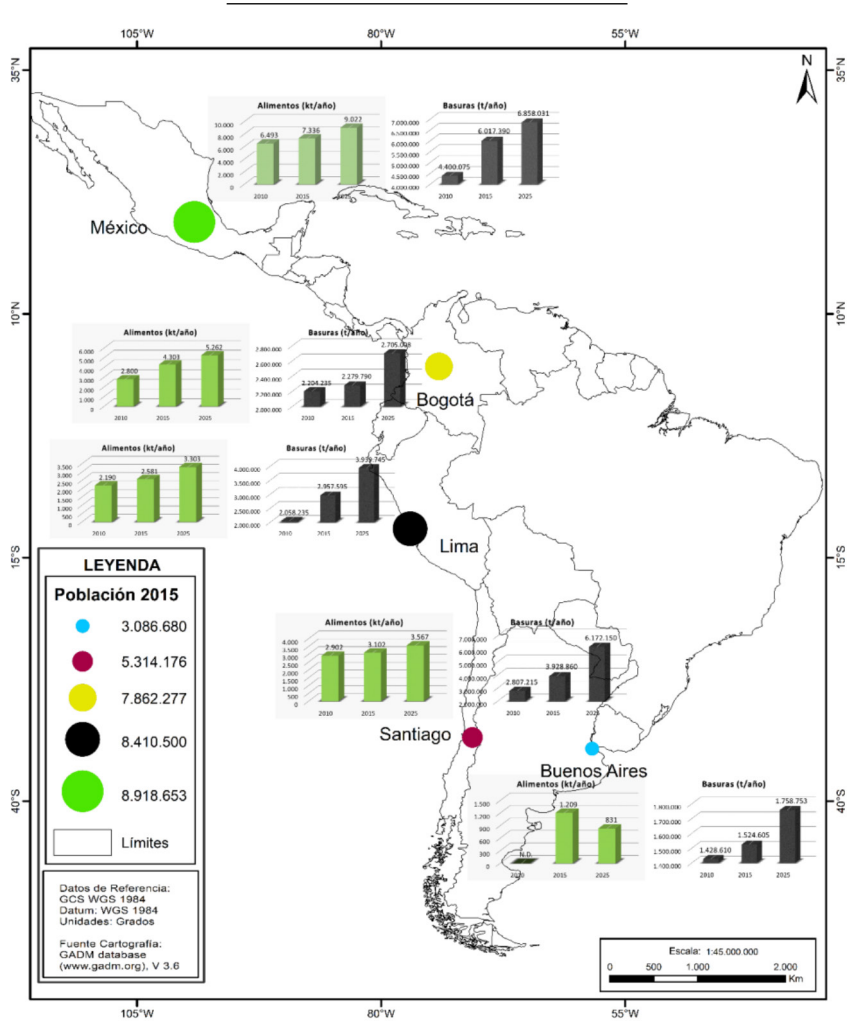
49 Al hablar de colapso metabólico de una ciudad, los gestores de política pública y académicos establecen tres grandes posiciones: 1) que es absurdo pensar en ese hecho, ya que los centros urbanos pueden abastecerse gracias a las robustas cadenas de suministro y a la capacidad de pago por los productos, a los beneficios de la infraestructura instalada y a las bondades de una técnica y tecnología en continuo avance. Claros ejemplos han sido Berlín con el Puente Aéreo de 1948 y las ciudades de Las Vegas (Nevada) y Dubái (Emiratos Árabes), que han dominado los sistemas más agrestes en virtud de la enorme disponibilidad de capital y a los grandes flujos de materia y energía desde regiones lejanas. 2) Que el colapso se verificará de forma lenta y comprometerá secuencialmente diferentes elementos del sistema (como las comunicaciones, la educación, la salud, la vivienda, la economía, la industria, el comercio, el

ortodoxia académica, la institucionalidad pública y la banca de inversión principalmente, para los cuales la ciudad brinda los valores y beneficios de la vida urbana, orgullo y razón de identidad nacional y una oportunidad para reducir la pobreza y aumentar la eficiencia en el consumo de materiales y energía (Kunzig, 2011; Macri *et al.*, 2011; Martine *et al.*, 2008, p. 2; UNSDSN, 2017; Tacoli *et al.*, 2008); por otro lado, la precaución de académicos con pensamiento crítico, ambientalistas y científicos de la complejidad, que no vislumbran un futuro urbano favorable, pues la ciudad ha demostrado pasar de la riqueza al deterioro, sufriendo un efecto *cenicienta* al aparentar opulencia, virtudes y belleza por instantes bajo hueros ideales y débiles finanzas y experimentando problemas de acceso a la tierra, de movilidad, desigualdad y creciente contaminación (Díaz, 2012b; Díaz y León, 2012; Fernández, 2016; Pirez, 1994; Sánchez-Rodríguez, 2008; Scobie, 1974).

Esta diferencia puede dirimirse al considerar los colapsos parciales urbanos o el precio termodinámico que pagan algunos habitantes en pro del crecimiento, puesto que para algunos gestores de política, administradores urbanos y líderes es viable considerar que “diferentes sectores pueden ser sacrificados en aras de la supervivencia o la expansión de la totalidad” (Adams, 2007, p. 180).

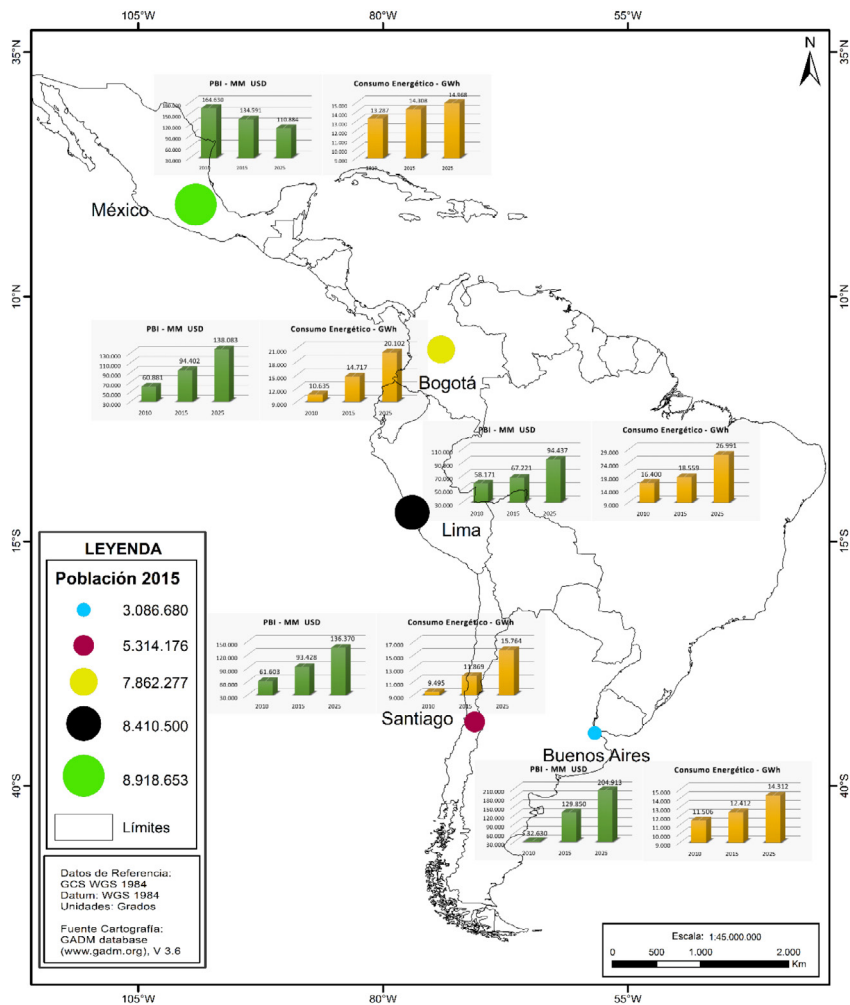
transporte, el gobierno, etc.). Muestra de ello ha sido la terrible pandemia de 2020, relacionada con la COVID 19. 3) Que el colapso puede verificarse con facilidad si se superan la homeostasis o los límites del sistema (posición clara de esta investigación).

Mapa 2a. Comportamiento de la población, del consumo de alimentos y de la generación de basuras para los años 2010, 2015 y proyección a 2025, para Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago



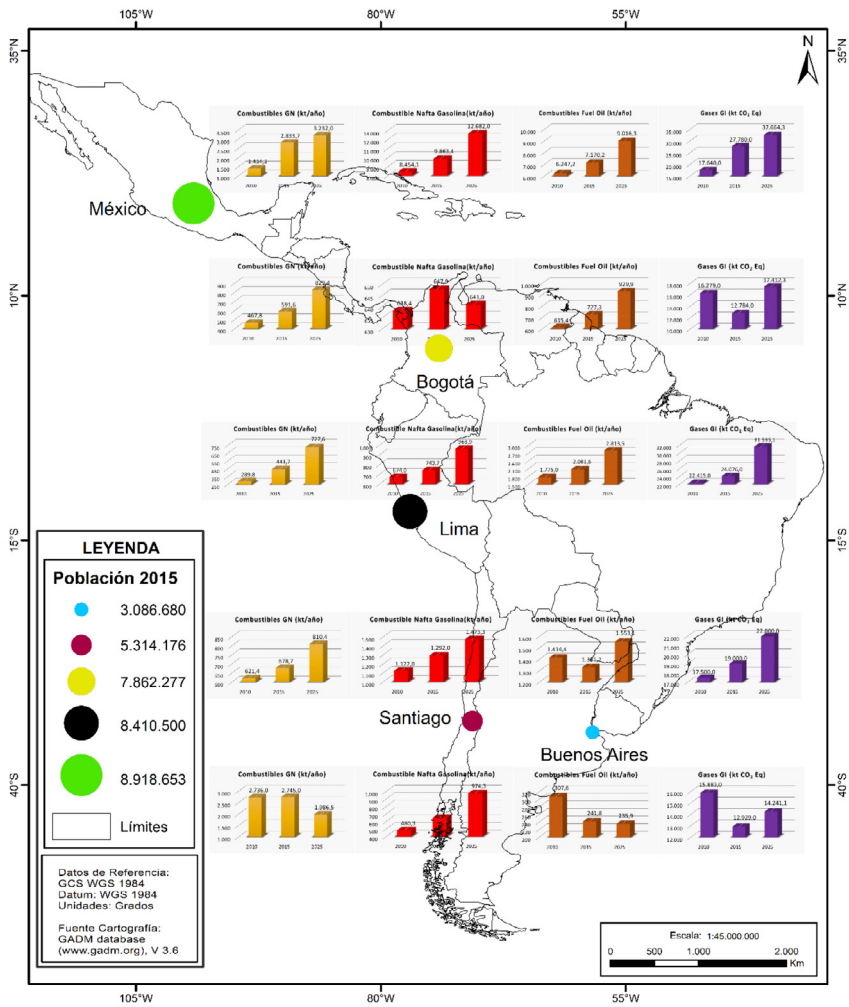
Fuente: elaboración propia.

Mapa 2b. Comportamiento de la población, del consumo de energía eléctrica y del valor del PIB para los años 2010, 2015 y proyección a 2025, para Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago



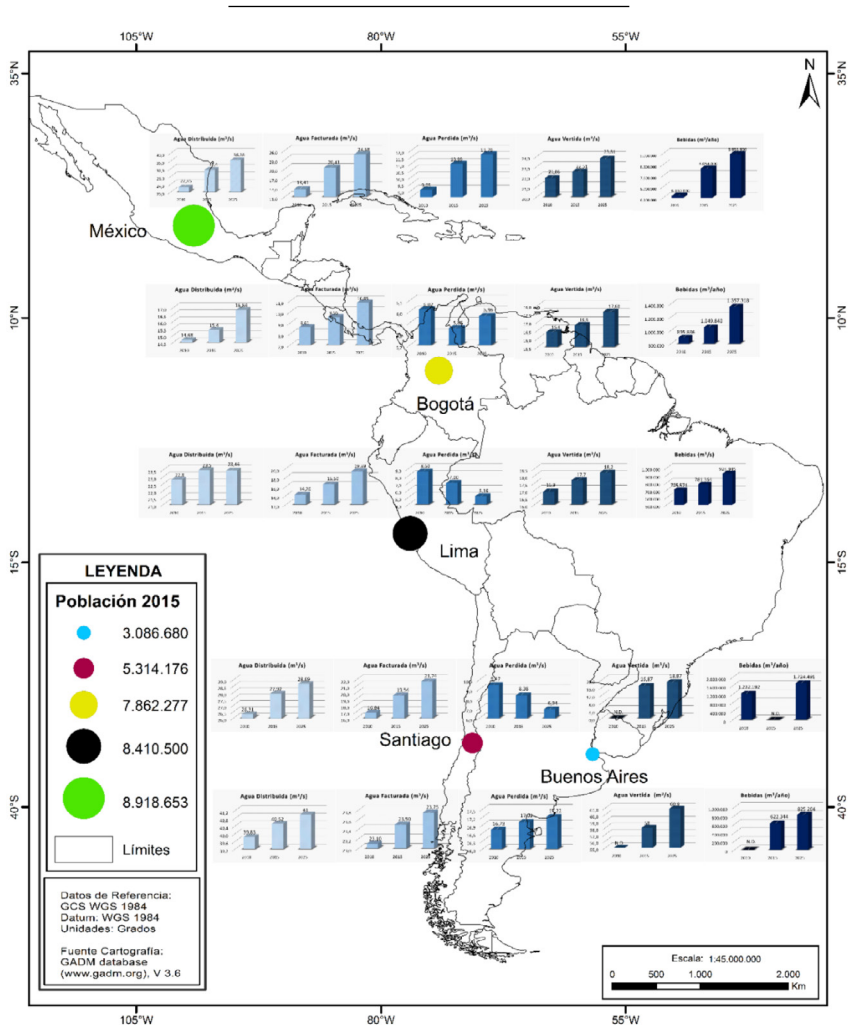
Fuente: elaboración propia.

Mapa 2c. Comportamiento de la población, del consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases GEI para los años 2010, 2015 y proyección 2025, para Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago



Fuente: elaboración propia.

Mapa 2d. Comportamiento de la población, del consumo de agua potable (distribución y facturación), del agua no contabilizada (pérdida), del consumo de agua en botella y los vertimientos para los años 2010, 2015 y proyección 2025, Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago



Fuente: elaboración propia.

3. Entropía en la ciudad: • complejidad, gestión y disipación

*La ciudad es una buena idea cuyo peor defecto
fue haberse convertido en realidad.*

Juanma Agulles (2017, p. 13)

Los cambios de estructura, función y relación de los centros urbanos durante sus fases de crecimiento y mantenimiento se expresan exitosamente con el incremento de su *stock* material, consolidación financiera, enriquecimiento cultural, cualificación y bienestar de la población y afianzamiento de las creencias, la fe y la religión. Pero en otras ocasiones el resultado es desalentador, al presentarse la degradación parcial de áreas urbanas, periurbanas, conurbanas y rurales, la destrucción del ambiente natural y construido, la pérdida de calidad de vida para muchos de sus habitantes y la abrupta desaceleración económica. Todo depende de procesos dinámicos y fortuitos soportados por el intercambio y transformación de materia, energía, información y dinero entre sistemas complejos, los cuales se encuentran inmersos en relaciones de poder, jerarquía y autoridad, totalmente dependientes de las leyes y principios naturales y expuestos al drama social⁵⁰ (Turner, 1974, 1886).

Ejemplos actuales de estos grandes sistemas son las capitales y ciudades emergentes⁵¹ latinoamericanas, que 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 corren el riesgo de exceder los límites permisibles de su propia homeostasis y adaptabilidad y afectar las zonas de frontera, los alrededores y depósitos de abasto y provisión, tal como se concluyó en el capítulo anterior. Esta situación exacerba su vulnerabilidad y

50 Se considera a Victor Turner para enfatizar el problema de los conflictos crecientes en las ciudades. Según el antropólogo social escocés, el drama del conflicto social consta de cuatro actos principales: 1) la ruptura de las relaciones sociales en virtud de las tensiones y disputas entre los individuos, 2) la crisis social que se desencadena, 3) las propuestas simbólico-rituales que establece el colectivo para sobrellevar el problema y 4) la afirmación operacional de los mecanismos establecidos para mejorar la situación.

51 El Banco Interamericano de Desarrollo las define como las 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 100 mil y 2 millones de habitantes” (BID, 2015).

riesgo de colapso⁵², en momentos en que la variabilidad climática, el calentamiento global, las crisis financieras y económicas, el descontento de la población, la violencia, las situaciones de conflicto, las pandemias y la creciente contaminación 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, de la eficiencia y eficacia de los procesos internos de transformación, de la disipación “socialmente responsable” de sus corrientes de desecho y de las redes de abastecimiento local, regional y global. Por tal razón, la caracterización y entendimiento del comportamiento de sus demandas materiales y energéticas, de la presión de sus descargas y de la entropía generada son importantes acciones para actuar oportunamente sobre las funciones de relación que pueden socavar el desarrollo, deteriorar el ambiente propio y circundante y reducir la oferta ambiental de los ecosistemas de soporte, que al fin de cuentas merman la competitividad de las capitales latinoamericanas en los aspectos local, regional y global (Díaz, 2014).

Por consiguiente, es imperativo no solo mejorar la homeostasis y adaptabilidad de los centros urbanos de estas economías y promover consumos racionales, sino además gestionar la entropía y fomentar flujos cíclicos de materiales y energía con una reducida afectación a los sistemas de abasto, provisión y circundantes. Esta iniciativa se fundamenta en el conocimiento y gestión del metabolismo urbano, en la posibilidad de relocalización del desorden generado y su potencial conversión en información útil. De igual manera, en la comprensión y el acatamiento de las leyes y principios naturales de parte tanto de quienes toman decisiones como de la ciudadanía en general.

3.1. 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

52 Existe una posición optimista de Rossana Reguillo (2005), que considera que la ciudad, como construcción social, se reinventa cada día a partir de los pequeños y grandes colapsos que experimenta en los múltiples subsistemas que la componen.

sistemas aledaños y soporte (UnHabitat, 2011, p. 4). Esta tendencia, que se agudizará para el año 2030 (UNDesa, 2008), la ven 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, p. 151), mientras que otros la consideran como una transformación positiva que coadyuvará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y al crecimiento económico (Martine *et al.*, 2008, p. 2; UNSDSN, 2017; Tacoli *et al.*, 2008, p. 47), ideal que muchas veces se convierte 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, las cuales se atribuyen principalmente a una urbanización sin industrialización, fundamentada en el consumo de una ficticia clase media creciente y a la especulación en el uso del suelo (Agulles, 2017; Martine *et al.*, 2008; WEF, 2017). Este imaginario de crecimiento económico como vía para el progreso continuo en el mundo rico y como salida de la pobreza para los países en desarrollo y economías emergentes define por antonomasia a la población y el capital como maquinarias que empujan exponencialmente la producción y consumo de alimentos, la utilización de recursos y los requerimientos energéticos y la generación de desechos (Meadows, Meadows y Randers, 1992, p. 51; Randers, 2012; WEF, 2017; Yusuf *et al.*, 2009, p. 75).

Este gasto, aunado al déficit de infraestructura y de acceso a servicios de calidad, establece brechas sociales, exclusión, inequidad y disparidad de oportunidades y así mismo, causa un deterioro ambiental tanto dentro del sistema urbano como en los asentamientos del conurbano y por supuesto, en los ecosistemas estratégicos y regiones proveedoras de bienes y servicios ambientales (Curtit, 2003; Díaz, 2011, p. 102; Sánchez-Rodríguez, 2008, p. 151).

Estos fenómenos de difícil control, alta inercia, rápida acción y cambio pueden provocar la superación de los límites homeostáticos y agotar la retroalimentación negativa del sistema urbano regional y generar —como riesgo probable— la declinación o descenso súbito, incontrolable e impremeditado de la producción y la capacidad indus-

trial de la población humana, de la complejidad política, económica y social, o la calidad de vida. Se ha advertido de estas crisis en varias épocas y por varias eminencias, como por ejemplo Thomas Robert Malthus (1798), Denis y Donella Meadows (1992) y Jared Diamond (2006) (tabla 3a).

Infortunadamente, estas advertencias no se tienen en cuenta en los planes de las ciudades capitales para alcanzar economías sanas que aseguren el bienestar de la población vulnerable y un buen des-

Tabla 3a. Advertencias sobre las principales fuerzas impulsoras que pueden exacerbar los conflictos sociales y ambientales en las ciudades

Thomas Robert Malthus, al afirmar que “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), dejó claro que el crecimiento desmedido de la población podía llegar a medrar la calidad de vida del colectivo, algo que sin duda se aprecia hoy en los guetos, zonas deprimidas, cinturones de miseria y periferia de las ciudades latinoamericanas.

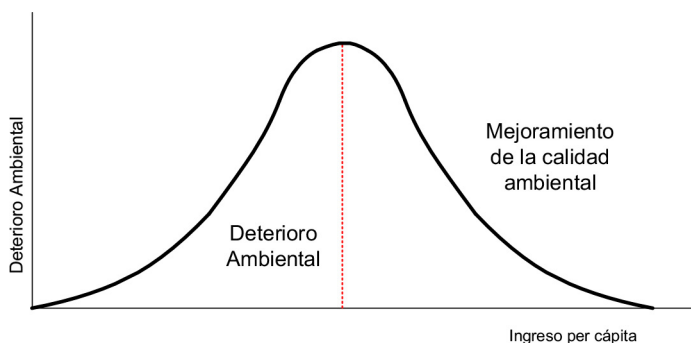
Por su parte, los autores del célebre libro *Los límites del crecimiento* advirtieron que “La utilización humana de muchos recursos esenciales y la generación de muchos tipos de contaminantes han sobrepasado ya las tasas físicamente sostenibles y que sin reducciones significativas en los flujos de materia y energía habría una incontrolada disminución per cápita de la producción de alimentos, el uso energético y la producción industrial” (Meadows *et al.*, 1992, p. 23), hechos que ya son una realidad en la forma de más de quince problemas ambientales globales.

Finalmente, Jared Diamond, al analizar las razones por la cuales algunas civilizaciones del pasado colapsaron, corrobora que la explosión demográfica, el consumo de recursos y el agotamiento de las fuentes de abastecimiento, entre otros problemas, validan las especulaciones malthusianas más siniestras (Diamond, 2006, p. 73).

Fuente: elaboración propia con información de Diamond (2006), Malthus (1798) y Meadows (1992).

empeño ambiental ya que los esfuerzos se concentran casi siempre en asegurar un crecimiento económico positivo netamente crematístico. Tal decisión se sustenta en la mal llamada curva ambiental de Kuznetz con respecto a la población, el crecimiento y el ingreso per cápita (figura 3a), que históricamente ha justificado políticas públicas que consideran la degradación ambiental como un efecto colateral en las primeras etapas del crecimiento económico y en la generación de riqueza y que explican la explotación de sus recursos naturales para financiar proyectos de energías renovables y que solo reconocen la redistribución de la riqueza como el único modo de obtener un medio ambiente aceptable (Beckerman, 1992, citado por Gómez, 2002; Kish, 2018; Thatcher, 1989). Esta interpretación de la curva de Kuznetz constriñe cualquier posibilidad de que las ciudades capitales de naciones pobres y economías emergentes puedan lograr el desarrollo de una manera ambientalmente responsable.

Figura 3a. La mal llamada curva ambiental de Kuznetz



Adaptado de Guthrie (1963) y Rostow (1960).

Esta crematística urbana se sustenta aún más en las declaraciones 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 explícito en el ODS 8 “promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos” (UN, 2009, p. 5; UN, 2018), e implícitamente relacionado con los otros dieciséis.

De esta manera, los ideales planteados por economistas del siglo XX como Guthrie (1963), Freedman (1961), Rostow (1960), Sirkin (1962) y Thurow (1981), entre otros, respecto al mejoramiento del tamaño, la eficacia y calidad de la fuerza de trabajo, el pleno empleo, la estabilidad de los precios, la distribución conveniente y satisfactoria de los recursos económicos y el ingreso, la acumulación de capital, la salvaguarda de los recursos naturales, el avance en ciencia, tecnología e innovación y el aseguramiento de un clima político y económico claro actualmente se consideran como utopías ante la creciente anomalía urbana (figura 3b).

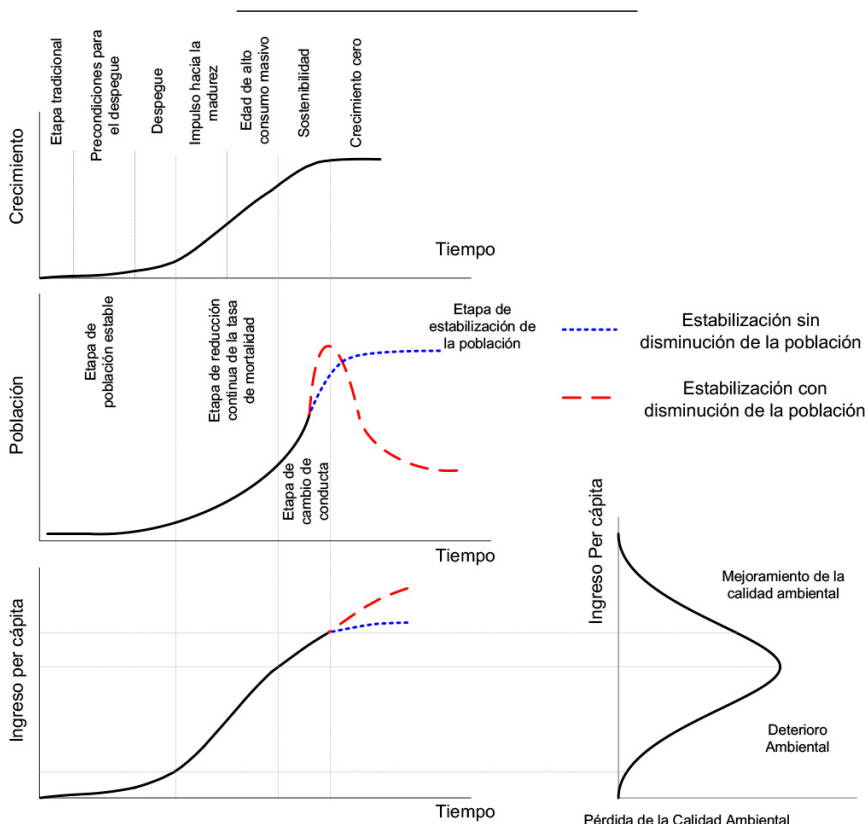
Por tal motivo, en muchas ciudades latinoamericanas este crecimiento económico se transformó en un “crecimiento no económico” a finales del siglo XX (Daly, 2001, p. 157) ya que la población creció exponencialmente, la redistribución fue inexistente, la lucha contra el desempleo⁵³ entró en franca retirada, la inequidad y falta de oportunidades aumentó, los sistemas naturales se convirtieron en parches en un paisaje intervenido y la contaminación *in crescendo* empezó a superar los límites permisibles, poniendo en riesgo la salud humana.

Es evidente que este arcaico concepto de *bienestar* en función del crecimiento y el consumo implica una trampa que progresivamente se convierte en una falsa ilusión, porque “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, 1981, p. 22). Este comportamiento humano ha exacerbado la desigualdad en el camino al crecimiento sostenido, situación evidente en las ciudades capitales estudiadas.

Esta situación define nuevos límites, áreas de estudio y cambios en los flujos M/E/I, que modifican la forma como el sistema se comporta consigo mismo, con el conurbano, con las áreas rurales y los ecosistemas estratégicos (Díaz 2011, p. 29). Lo lamentable es que esta forma de relación ignora la infalibilidad de los principios y leyes naturales

53 Esta tendencia se evidencia al aumentar el trabajo informal, los trabajos temporales y los contratos por prestación de servicios, que sin duda no le generan la misma garantía al trabajador ni los mismos beneficios en materia de seguridad social ni estabilidad.

Figura 3b. La curva ambiental de Kuznetz y su relación con el crecimiento económico, la dinámica poblacional y el ingreso per cápita ^{(a)(b)}



^{a)} El significado de la mal llamada curva ambiental de Kuznetz con respecto a la curva de crecimiento de la población, a la curva de crecimiento y a la curva de ingreso per cápita muestra que “el crecimiento económico en sus primeras etapas conduce a la degradación del ambiente... finalmente el mejor y probablemente el único modo de obtener un medio ambiente aceptable es enriquecerse” (Beckerman, 1992, citado por Gómez, 2002, p. 9).

^{b)} En cuanto a la pseudoestabilidad anhelada entre la ciudad y los sistemas naturales de abasto, provisión y amortiguamiento, se ha reiterado en esta investigación que 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.

Fuente: elaboración propia con información de Guthrie (1963), Freedman (1961), Rostow (1960), Sirkin (1962) y Thurow (1981).

y conduce impremeditadamente a un colapso ambiental, que a su vez generará cambios en los órdenes social, político y económico.

Ante esta desconcertante situación, exacerbada por la creciente producción del territorio urbanizado (Curtit, 2003, p. 17), los Gobiernos local y nacional pueden adoptar nuevos esquemas para evitar situaciones de insostenibilidad, entre las que se encuentran: 1) alcanzar una curva de distribución viable entre la tríada crecimiento, ambiente y desarrollo, a partir de la sostenibilidad débil; 2) considerar un crecimiento cero, a partir de la sostenibilidad fuerte; 3) optar por la “cuadratura del círculo” del desarrollo sostenible, que sabiamente critica Leonardo Tyrtania (2009, p. 132); 4) considerar un decrecimiento económico, o 5) gestionar la entropía y establecer metabolismos cíclicos a partir de una aproximación termodinámica.

3.2. Aproximación urbana desde la termodinámica clásica

Todas las diversas formas de vida urbana sienten y sufren —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, contaminación de los cuerpos de agua, degradación y desertización de suelos, liberación, bioacumulación y biomagnificación de compuestos orgánicos persistentes y metales pesados, pérdida de biodiversidad e incremento en el volumen de basuras, por citar los más reconocidos por la población (Díaz, 2018).

Tal condición de estado 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 y el aumento de la inseguridad, entre otros problemas. Esta realidad urbana se puede analizar desde la perspectiva de la principal ciencia de la complejidad: la termodinámica (Prigogine, 2012, p. 29), la cual se desarrollará y explicará a continuación según la formulación no atomista de los procesos reversibles, irreversibles y la economía ecológica.

Este arriesgado planteamiento, que en primera instancia generaría repulsión a partir de la complejidad —que atiende los procesos según la estocástica e indeterminación—, se sustenta en dos axiomas termodinámicos, a saber: 1) que el cambio de entropía ΔS es el mis-

mo en las trayectorias reversibles e irreversibles y 2) que el valor del cambio de entropía ΔS en un sistema es el mismo, cualquiera que sea el método que se utilice, sea este la termodinámica atomista o la no atomista (Abbott y Van Ness, 1975; Ben-Naim, 2011; Cengel y Boles, 1994, 2012; Smith, Van Ness y Abbott, 1997). Por tanto, en esta investigación —como aproximación *pathfinder*⁵⁴—, se optará por el desarrollo teórico y conceptual de la máquina térmica compleja, como se describirá más adelante.

3.2.1. Formulación no atomista de las leyes de la termodinámica

De una manera no atomista, la termodinámica se fundamenta en cuatro principios o leyes (ley cero, primera, segunda y tercera ley), que se complementan —para efectos de esta investigación— con un quinto enunciado de la economía ecológica por Georgescu-Roegen (que no se considera en la ortodoxia de la fisicoquímica, pero sí en esta ciencia de la complejidad). Estos principios se enunciarán a continuación, tanto en términos formales como en los propios del estudio de las ciudades⁵⁵, bajo el amparo de las definiciones y disertaciones de Abbott y Van Ness (1975), Ben-Naim (2011), Carpintero (2006), Cengel y Boles (1994, 2012), Georgescu-Roegen (1971, 1979, 1983), Keena y Shapiro (1947), Russell y Adebisi (1993) y Smith, Van Ness y Abbott (1997), a saber:

1) Ley cero: “Si dos sistemas [urbanos] están en equilibrio con un tercero, entonces deben estar en equilibrio entre sí”.

2) Primera ley: “El cambio de energía total durante un proceso adiabático [urbano] debe ser igual al trabajo neto realizado”⁵⁶ (ecuación 3a). Esta ley se conoce también como el “principio de conservación de la energía”, cuyo axioma dice que la energía total de

54 Al mencionar la palabra *Pathfinder*, que significa ‘abrir o encontrar un camino nuevo’, se considera su concepción castrense: los balizadores aerotransportados, que —bajo el mayor riesgo posible— señalan el camino para que otros avancen en una misión de mayor alcance (Fort Benning, 2018). Por consiguiente, en esta investigación se corre el riesgo académico para que otros puedan ir más lejos en la comprensión de la termodinámica urbana.

55 En las definiciones se encontrarán las palabras [ciudad] y [urbana] entre corchetes. Esto se hace con el fin de facilitar el isomorfismo y facilitar la interpretación del concepto a la realidad urbana.

56 En un proceso cíclico [urbano], el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado.

cualquier sistema y su medio que lo rodea —considerados juntos— se conserva.

Primera ley: $\Delta E = Q - W$ Ec. 3a

Donde ΔE : cambio de energía total del sistema.

Q : calor suministrado al sistema.

W : trabajo realizado por el sistema.

Para una ciudad, este principio define que el cambio diario de energía experimentado por el asentamiento humano es proporcional a la energía suministrada (calor y energía eléctrica) y al trabajo realizado por el sistema urbano. Es decir, la ciudad se mantiene en un pseudoestado estable en virtud de una cantidad determinada de energía transferida, que al fin de cuentas provoca desplazamientos de masa en el espacio y el tiempo, es decir, trabajo (W).

3) Segunda ley-enunciado de Rudolf Clausius (bombas de calor): “Es imposible construir un dispositivo [ciudad] que opere en un ciclo [de una manera específica] y no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo a baja temperatura [lugar] a otro [lugar] de alta temperatura”⁵⁷.

Enunciado de Kelvin-Plank (máquinas térmicas): “No puede haber motor cíclico alguno [máquina térmica urbana] cuyo único efecto sea bombear energía de un depósito de calor y convertirla completamente en trabajo”. Este postulado también puede enunciarse así: “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 3b). Además, el enunciado Kelvin Plank de eficiencia manifiesta que ninguna máquina térmica (ciudad) puede tener una eficiencia térmica del 100 % (ecuación 4c).

Segunda ley: $|W| = |Q_H| - |Q_C|$ Ec. 3b

⁵⁷ La formulación de Clausius corresponde a un fenómeno inevitable: que el calor fluye siempre de un cuerpo caliente a un cuerpo más frío, cuya formulación es: “No existe ningún proceso espontáneo cuyo efecto neto sea únicamente la transferencia de calor de un cuerpo frío a un cuerpo caliente” (Ben-Naim, 2011, p. 39).

Donde, $|W|$: cantidad neta de trabajo.
 $|Q_H|$: calor absorbido de la reserva caliente (v. gr. hornos donde la temperatura se mantiene gracias a la combustión).
 $|Q_C|$: calor descartado a la reserva fría (sistemas naturales como la atmósfera y los cuerpos de agua).

Esta segunda ley puede expresarse de la siguiente manera para las ciudades y demás asentamientos humanos: “El calor en la ciudad región fluiría del punto de alta temperatura —que se enfría en el proceso— al punto de baja temperatura —que se calienta—” (Formulación de Clausius); o también, “No existe ciudad alguna que convierta toda la energía eléctrica o térmica en trabajo útil”. Por tanto, siempre habrá pérdidas de energía por la imposibilidad de lograr transformaciones de M/E/I 100 % eficientes (ecuación 3c).

Eficiencia térmica de una máquina: Ec. 3c

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

Donde, $|W|$: cantidad neta de trabajo.
 $|Q_H|$: calor absorbido de la reserva caliente.
 $|Q_C|$: calor descartado a la reserva fría.

Así mismo, de la segunda ley se desprende el concepto primario de *entropía* (S), que es una propiedad intrínseca relacionada funcionalmente con los depósitos de calor, la temperatura y la cantidad de materia, propiedad cuya magnitud rige el curso de los hechos en cualquier proceso de transformación M/E/I, que siempre va en aumento y que no se rige por la ley de la conservación⁵⁸ (ecuación 3d).

Entropía: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$ Ec. 3d

58 Cengel y Boles (2012) demuestran que la entropía solo se conserva en procesos reversibles idealizados, ¡que no existen! Por tal motivo, no es posible establecer a un principio de conservación de la entropía.

Donde δQ : cantidad diferencial de transferencia de calor hacia el sistema (positivo +) o desde el sistema (negativo -). T : temperatura en la condición de frontera.

Nota: aunque este axioma se enunció para procesos reversibles, su uso en la evaluación de procesos irreversibles es válido⁵⁹ ya que el cambio de entropía en ambos procesos es el mismo (Smith, Van Ness y Abbot, 1997).

De manera que la entropía se consideraría, en el contexto urbano, como una propiedad extensiva no conservativa, que podría relacionarse con las formas de materia, energía e información que no tienen un aparente uso inmediato y que, por su naturaleza y variación de producción por unidad de tiempo, se convierten en flujos contaminantes en las matrices ambientales aire, agua, suelo y biota.

4) Tercera ley: “La entropía de una sustancia pura en equilibrio termodinámico [ciudad] tiende a cero cuando la temperatura de la sustancia pura [ciudad] se acerca al cero absoluto”. Esta ley también puede enunciarse así: “La entropía de una sustancia pura cristalina [ciudad] a una temperatura absoluta de cero es cero”. Esta ley advierte que la única forma de evitar la generación de entropía en una ciudad o asentamiento humano es operando los procesos de transformación a una temperatura de 0° K (-275 °C), la cual es imposible de alcanzar⁶⁰.

5) Cuarta ley desde el punto de vista de la economía ecológica. Enunciado de Georgescu Roegen: “La materia disponible se degrada de forma continua e irreversible en materia no disponible, porque el uso de esta —en cualquier trabajo mecánico— provoca pérdidas por

59 Propiamente, la ecuación dQ/T se puede utilizar en procesos irreversibles, al trazar una trayectoria termodinámica que produzca el mismo cambio de estado que el proceso reversible.

60 La tercera ley desmiente planteamientos descabellados de ambientalistas ultranza, como Tatiana Roa Avendaño (2005) de Censat Agua Viva, que propone una entropía cero para la economía en Colombia. Algo así implicaría operar al cero absoluto un sistema cerrado, o su muerte termodinámica.

fricción, desgaste de materiales, pérdida de pureza y contaminación”. Por tanto, es imposible llevar a cabo el reciclaje total y completo de materiales en una economía de “basura cero”.

Desde el planteamiento de los límites que existen en un proceso de transformación de la materia y a partir de la lógica de flujos y *stocks*, Georgescu Roegen (1996) dividió los factores de producción en *elementos de fondo* —agentes— y *elementos de flujo* —sobre los cuales los agentes actúan o utilizan—, para lograr una expresión de producción como funcional matemático (ecuación 3e) y como función punto ordinaria (ecuación 3f), las cuales fueron alternativas a las propuestas matemáticas neoclásicas del momento que no consideraban estos límites fisicoquímicos:

$$Q_0^T(t) = f \left[R_0^T(t); I_0^T(t); M_0^T(t); Q_0^T(t); W_0^T(t); L_0^T(t); K_0^T(t); S_0^T(t); C_0^T(t); H_0^T(t) \right]$$

Ec. 3e

$$q = f(r, i, m, q, w, L, K, S, C, H)$$

Ec. 3f

Donde	R: Recursos naturales (flujo de entrada)
	I: Materiales transformados en productos (flujo de entrada)
	M: Insumos para mantenimiento de proceso (flujo de entrada)
	Q: Producto terminado (flujo de salida)
	W: Desechos (flujo de salida)
	L: Tierra ricardiana (elemento de fondo)
	K: Capital propiamente dicho (elemento de fondo)
	S: Stock
	C: Fondo de proceso que refleja la totalidad de la transformación de entradas de material en producto terminado.
	H: Fuerza de trabajo (elemento de fondo)

Este postulado pretende explicar que la materia existe en forma homogénea y en bloque y en dos estados cualitativos diferentes, a saber: disponible y no disponible. La materia disponible es la que se utiliza en la producción y consumo dentro del sistema económico

—la que permite realizar trabajo—, mientras que la materia no disponible se relaciona con materiales degradados o contaminados. Por consiguiente, se puede decir que esta *cuarta ley de la termodinámica desde la perspectiva de la economía ecológica* advierte la disipación continua de la materia respecto del gasto energético de cualquier sistema económico⁶¹.

Esta *cuarta ley* permite, además, señalar que existen restricciones termodinámicas en el uso de la materia; que la producción de bienes de toda clase acrecienta la brecha entre el consumo *endosomático* de energía (necesaria para el metabolismo biológico) y su uso *exosomático* (el necesario para la iluminación, ciclos de potencia, combustión, etc.); que el problema de la población tiene que ver con la máxima cantidad de vida que puede soportar la dotación natural y el constructo antrópico y que los *stocks*, flujos y usos de las distintas formas de masa y energía de baja entropía son necesarios para la sostenibilidad (Georgescu Roegen, 1996; Posada, 1999). Finalmente, se puede mencionar que estos cinco postulados termodinámicos, junto con los demás principios naturales y leyes fisicoquímicas, actúan como restricciones al ideal económico de un sistema complejo, principalmente en lo relacionado con la producción y el consumo (Carpintero, 2006).

3.2.2. Aplicación de los principios al caso urbano

En el caso urbano (tabla 3b), los *principios cero y primero* explican que el flujo, uso y transformación de cualquier forma de energía en la ciudad determinarán que la región y las zonas del conurbano, áreas rurales y ecosistemas estratégicos tiendan a homogeneizarse energéticamente con el polo de mayor consumo. Esta realidad se verifica —de una manera simple— con una distribución radial de depósitos y usos de energía, que expresan diferentes valores de iso-líneas de temperatura en el espacio-tiempo, que da como resultado

61 Georgescu Roegen (1996) llegó a esta conclusión después de identificar seis asimetrías (A) del sistema económico productivo, a saber: 1) que el componente terrestre es un *stock*, mientras que el solar es un flujo (A1); 2) que su tamaño es considerablemente menor que el solar (A2); 3) que es imposible transformar la energía en materia (A3); 4) que la utilización de la energía solar, aunque libre de contaminantes (A5), presenta más inconvenientes que la terrestre (A4); y 5) que la supervivencia de todas las especies terrestres depende de la radiación solar (A6) (Posada, 1999).

el fenómeno de isla de calor. De igual forma, en la distribución de la infraestructura, cobertura y existencia de servicios e índices de desarrollo humano, entre otros factores.

Tabla 3b. Definición y aplicación de los principios termodinámicos en las ciudades

Principio termodinámico	Interpretación urbana	Ejemplo
Ley cero: <i>si dos sistemas están en equilibrio con un tercero, entonces deben estar en equilibrio entre sí.</i>	Ley cero: si dos urbes tienden a la homogenización con una tercera, entonces todas consolidarán un único paisaje urbano.	– La homogenización del paisaje urbano regional o global, o ambos. – Los procesos de conurbación, industrialización y desindustrialización.
Primera ley: <i>en un proceso cíclico, el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado. La energía total de un sistema y el medio que lo rodea, se conserva</i>	Primera ley: en los procesos urbanos, el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado para su mantenimiento y crecimiento. El trabajo neto realizado en una ciudad permite su mantenimiento en pseudoestados estables.	– El consumo de energía eléctrica y combustibles es necesario para asegurar el funcionamiento urbano. – El crecimiento económico exige el consumo energético y másico.
Segunda ley: <i>es imposible que una máquina térmica —que opera en un ciclo— reciba calor de un solo dispositivo y produzca una cantidad neta de trabajo.</i>	Segunda ley: una ciudad no puede convertir toda la energía disponible y consumida en trabajo útil. Así mismo, no hay asentamiento humano alguno cuyos procesos de transformación M/E/I sean 100 % eficientes	– Las pérdidas de energía que se presentan en cualquier proceso. – La disipación de energía y el fenómeno de isla de calor.

(Continúa)

Principio termodinámico	Interpretación urbana	Ejemplo
Entropía: medida de la energía no utilizable en un sistema termodinámico. Medida del desorden de un sistema.	Entropía: propiedad emergente que da cuenta de la energía no útil y del nivel de desorden urbano alcanzado.	– Las formas de energía y materia no útiles en el supuesto urbano. – Las corrientes contaminantes y la pérdida de calidad ambiental.
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.	– Las ciudades tienden a expresar menos desorden en época de invierno que en época de verano. – Igualmente, urbes situadas en pisos térmicos altos tienden a expresar menos desorden que sus congéneres a nivel del mar.

Fuente: elaboración propia a partir de los postulados teóricos termodinámicos de Abbott y Van Ness (1975), Ben-Naim (2011), Carpintero (2006), Cengel y Boles (1994, 2012), Díaz (2019), Georgescu-Roegen (1971, 1979, 1983), Keena y Shapiro (1947), Russell y Adebisi (1993), Smith, Van Ness y Abbott (1997).

Este fenómeno de isla de calor o isla térmica también se debe al rigor y certeza de la *segunda ley de la termodinámica*, puesto que no es posible aprovechar en su totalidad la energía⁶² que fluye hacia la ciudad, dentro ella y desde ella, razón por la cual, parte de esta se disipa en función de un gradiente térmico que se observa entre los espacios urbanos densamente ocupados y la periferia (EPA, 2009).

Por su parte, el aumento de temperatura en la ciudad se atribuye al comportamiento *energívoro* para asegurar el transporte de personas, materiales e insumos, la transformación de formas M/E/I, la

62 Para el caso de esta investigación, las formas de energía objeto de estudio son la eléctrica, la radiación solar y la química, asociada a los combustibles y alimentos.

construcción de obras civiles, la prestación de servicios educativos, de salud y financieros y para el divertimento y en la gestión de cualquier tipo de residuo, etc.; toda una expresión de trabajo realizado para mantener la vida urbana. Situación contraria de los depósitos fríos en la frontera, sus alrededores y ecosistemas aledaños, en los cuales la temperatura es menor a causa del ambiente natural predominante, en especial los cuerpos de agua y a la baja presencia antrópica.

3.3. La entropía urbana desde la perspectiva de la termodinámica no atomista

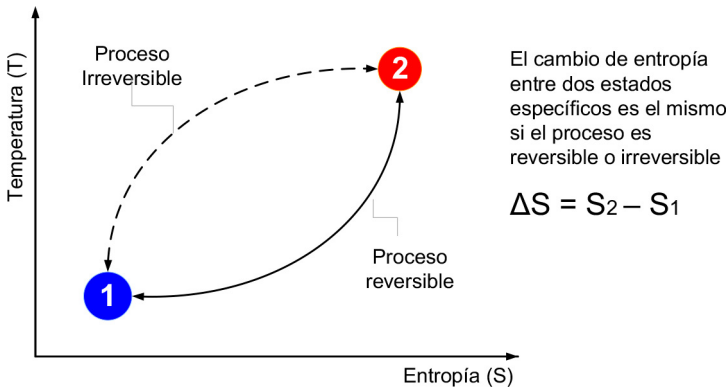
Desde el punto de vista de la termodinámica no atomista⁶³, es importante aclarar que la *entropía* corresponde a energía degradada, que siempre va en aumento cuando ocurre un fenómeno de transferencia de calor. Propiedad con valores fijos en estados fijos cuyo cambio (ΔS) entre dos estados es el mismo, sin que importe qué trayectoria siga el proceso, sea reversible o irreversible (Cengel y Boles, 2012. p. 334) (figura 3c). Este postulado permite la aproximación no atomista a los procesos irreversibles, como los que acaecen en los sistemas complejos (Smith, Van Ness y Abbott, 1997), algo fundamental para esta disertación.

$$\Delta S_{\text{Total}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}} \quad \text{Ec. 3f}$$

Considerando la ciudad como sistema complejo 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 másicos que existen y su magnitud siempre aumentará por causa del flujo entrópico proveniente del mundo externo y la producción propia del sistema. De esta manera se expresa el principio

63 Esta aproximación a la entropía a partir de la teoría no atomista considera la ciudad como una máquina térmica compleja, un sistema macroscópico cuyas fluctuaciones son progresivas y lentas, y en el que las diminutas partículas —constituidas por seres humanos y biota en general— no presentan movimientos brownianos. Sin embargo, esta aproximación no descalifica la interpretación de Boltzman de la entropía: $S = K \ln \Omega$ (donde K es la constante de Boltzman y Ω es el número de maneras distintas en que las partículas microscópicas pueden distribuirse entre los estados a los que tienen acceso). En este asunto, es menester advertir que la entropía S de Boltzman y Gibbs es el valor promedio estadístico para el conjunto macroscópico (Smith, Van Ness y Abbott, 1997); por tanto, un mayor número de estados concebiblemente determinan una gran cantidad de desorden, o como menciona Ben-Naim (2011): una alta incertidumbre.

Figura 4c. Cambio de entropía entre dos estados y trayectorias reversible o irreversible



Fuente: elaboración propia con información de Abbott & Van Ness (1975), Cengel y Boles (1994), Cengel y Boles (2012) y Díaz (2019).

de incremento de la entropía⁶⁴ (ecuación 3g), en el que ΔS siempre será mayor que la transferencia de entropía.

$$S_{Total} > 0 \quad \text{Ec. 3g}$$

Sin embargo, es importante aclarar que el postulado no excluye que un sistema abierto pueda disminuir su entropía total⁶⁵, lo cual es posible si logra disiparla hacia los alrededores (δS positivo). Esta externalidad del sistema urbano le permite mantener un estado pseudoestable —aunque genere entropía interna— a costa de sus alrededores. Este principio de incremento de entropía además permite distinguir entre el pasado y el futuro de una ciudad, en virtud de la irreversibilidad del fenómeno, a saber: “Si en el instante t_1 de un sistema hay una condición de estado, un t_2 , mayor que t_1 , es viable si el nivel de entropía aumenta” (Battaner, 2005, p. 43) (ecuación 3h)

$$t_2 > t_1, \text{ si y solo si, } S_2 > S_1 \quad \text{Ec. 3h}$$

64 Es aquí donde la irreversibilidad toma importancia, principalmente, porque todos los procesos naturales, los correspondientes a sistemas colaborativos cognitivos y ciertos constructos humanos urbanos, involucran un aumento de la entropía total.

65 Cengel y Boles (2012, p. 337) enuncian que “[e]l cambio de entropía de un sistema puede ser negativo durante un proceso, pero la generación de entropía no”. Esta ley es absoluta, y no admite excepciones cuando se formula en el marco de la termodinámica no atomista (Ben-Naim, 2011).

Por tanto, al ser la ciudad un sistema complejo que se comporta como una máquina térmica, su aparente estado ordenado se logra cediendo entropía positiva al medio circundante (en este caso el conurbano, la ruralidad y los ambientes naturales), desordenándolo con formas de calor, flujos no aprovechables de materiales y sustancias químicas peligrosas, al tiempo que importa materia con alto valor energético o energía poco degradada del entorno. A este tipo de “orden” se le ha llamado entropía negativa (Bettini, 1998), neguentropía (Schrödinger, 1945) o información útil (Ben-Naim, 2011) (tabla 3c y figura 3d).

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 otras anomalías. 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.

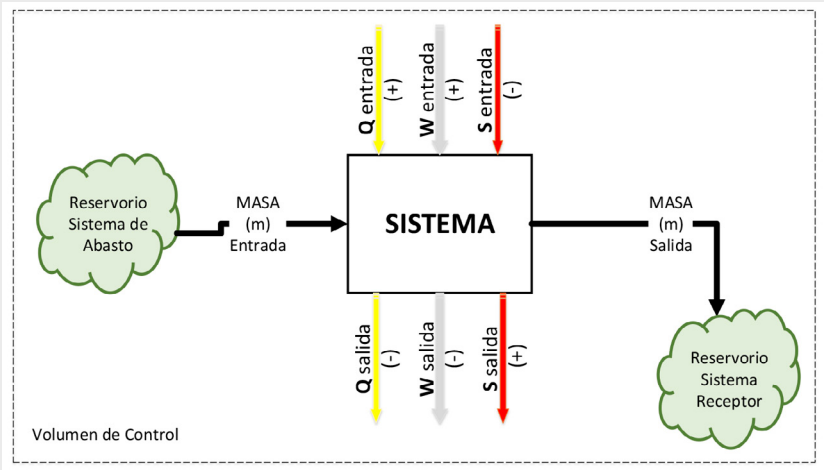
Por consiguiente, el trabajo termodinámico en el que incurre la ciudad para mantener un orden aparente del sistema y evitar su muerte térmica implica la paradoja de generar mayor entropía interna y por ende la disipación, hecho que Lewis Munford (1961, p. 669) evidenció al comparar la ciudad con la Reina Roja en el libro *Alicia a través del espejo*: “Realizando grandes esfuerzos y alcanzando una velocidad vertiginosa, logra a duras penas mantenerse en la misma posición”.

Por último, 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, el incremento en el valor de la entropía 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.

Tabla 3c. Entropía, entropía negativa o neguentropía

Cuando se menciona que el sistema complejo urbano logra ceder entropía positiva al medio circundante, al tiempo que captura o importa entropía negativa (Bettinni, 1998), neguentropía (Schrödinger, 1945) o información útil (Ben-Naim, 2011), simplemente se está hablando de una dirección de flujo (figura 4d) para efecto de los balances de energía.

Figura 3d. Esquema representativo de los flujos de materia, energía y entropía en un sistema abierto



Para familiarizar al lector con la convención de signos en cuanto al calor, el trabajo y la entropía se refiere, se ofrece la siguiente explicación: el calor (Q) que ingresa a un sistema y el trabajo (W) que se realiza sobre él, por convención, tiene signo positivo (+). Por el contrario, el calor (Q) liberado por el sistema y el trabajo (W) que se efectúa o realiza en su entorno se representa por el signo negativo (-). Para el caso de la entropía, la representación es contraria ya que a su liberación o disipación se le asigna un positivo (+), mientras la que proviene de los alrededores tiene un signo negativo (-).

Así las cosas, en términos numéricos, es un imperativo categórico dejar claro que el calor (Q), el trabajo (W) y la entropía (S) son cantidades algebraicas con símbolos asociados. Por tanto, no hay calor o trabajo negativo, ni tampoco hay entropía negativa; solo se le atribuye un signo para esclarecer que esta sale o que proviene de los alrededores.

Entonces, ¿por qué Schrödinger y Bettini hablan de entropía negativa, cuando un valor negativo ($S < 0$) es indicativo de un proceso imposible en el universo conocido? Simplemente por utilizar un antónimo en la correspondencia: desorden es a orden, lo que entropía es a neguentropía o entropía negativa. Es lo mismo que ocurre con la propuesta de Arie Ben-Naim (2011), cuando sugiere sustituir la palabra *entropía* en la termodinámica atomista por *neguentropía*, *información perdida* o *incertidumbre*.

Por esta razón en esta investigación se es fiel a la rigurosidad de la simbología, más cuando el marco de referencia es la consideración de la ciudad como una máquina térmica compleja, no como un sistema de partículas atómicas, átomos o moléculas con escalas regidas por el número de Avogadro: $6,022 \times 10^{23}$ partículas/mol. ¡Eso supera la escala de la mayor ciudad que se pueda imaginar en el planeta Tierra!

Fuente: elaboración propia.

3.4. Contribuciones de la entropía a los estudios urbanos

Al lograr validar, desde los planteamientos de Abbott y Van Ness (1975), Ben-Naim (2011), Cengel y Boles (1994, 2012), Smith, Van Ness y Abbott (1997), entre otros autores enunciados, la posibilidad de utilizar la propiedad de la entropía y su cambio en procesos irreversibles a partir de la termodinámica clásica, es necesario conocer las principales contribuciones y propuestas que según este concepto se hacen para los estudios urbanos. Aunque Clausius (1867), Boltzmann-Plank (1900), Shannon (1948), Jaynes (1957) y Prigogine (1962) interpretaron la entropía como energía no disponible *in crescendo*, como expresión del desorden de un sistema, como incertidumbre en la información, como fenómeno coherente con la mecánica cuántica y como dialéctica entre orden y desorden, respectivamente, los autores que a continuación se enuncian internalizaron el concepto para comprender, describir y predecir el comportamiento de sistemas urbanos regionales.

La comprensión de las dinámicas hidrológicas y geomorfológicas en el paisaje (Leopold y Langbein, 1962); el análisis de la variabilidad, distribución espacial y cálculo de incertidumbres de personas y objetos en el terreno (Batty, 1974; Wilson, 1970); la definición de estándares de vida óptimos en supuestos de baja entropía en el contexto de los análisis sociológicos (Bailey, 1990); la evaluación de los procesos ecológicos y tecnológicos en economías urbanas a diferentes

escalas bajo el concepto de *emergía* (Brown y Ulgiati, 1997); el cálculo de las posibilidades de comportamiento social urbano (Stepanic *et al.*, 2000); el estudio de los procesos de fragmentación y legalidad en el uso y propiedad de la tierra (Parisi, 2002); la disertación sobre el uso de energías renovables para atender los requerimientos de las ciudades (Ángel y Velásquez, 2008); la alerta de una economía entrópica y no circular (Martínez, 2015), y el isomorfismo potencial en la aplicación de las leyes de la termodinámica para los estudios de sostenibilidad ambiental (Díaz y Pulecio, 2016) son algunos de los elementos sobre los cuales la entropía ha sido considerada en el estudio de los asentamientos humanos (tabla 3d).

Así mismo y al considerar que las ciudades son las invenciones humanas que más energía consumen en el planeta y que su expansión es casi inevitable, algunos trabajos han considerado el concepto de *entropía* en el análisis de tiempos y movimientos en los patrones de flujo de información y de personas en la estructura espacial urbano-regional (Ayeni, 1976); otros la incluyeron de manera conceptual en los procesos de planificación ecológica urbana (Fariña y Ruiz, 2002; Fistola, 2011) y en la conceptualización de la termodinámica de la supervivencia humana desde la antropología (Adams, 2007).

Actualmente, la entropía —aunque reducida a una medida de la eficiencia energética— es considerada como un indicador de la sostenibilidad urbana (Purvis, Mao y Robinson, 2016) y concepto rector para el desarrollo de la infraestructura y la planeación espacial en *Ciudades de baja entropía*⁶⁶ (Pelorosso, Gobattoni y Leone, 2017; Perellosso *et al.*, 2018). Sin embargo, es importante aclarar que la mayoría de los trabajos analizados solo enuncian o exponen ideas sobre la segunda ley, sin presentar desarrollos matemáticos que den cuenta de la termodinámica en los asentamientos humanos o que permitan calcular la entropía generada. Solo desarrollan los enunciados de Clausius —termodinámica clásica— y de Boltzman —desde la termodinámica atomista—, sin lograr su aplicación directa, salvo la propuesta matemá-

66 Una ciudad de baja entropía se define como un nicho sociocultural, humano, receptivo y consciente autopoietico que evoluciona y crece, mejorando su complejidad socioeconómica y estructural al reducir su nivel de entropía interna, al agregar y optimizar elementos funcionales y sinapsis entre estos elementos, mientras que los desechos (entropía exportada a la biosfera) se reducen al mínimo (Pelorosso, Gobattoni y Leone, 2017).

Tabla 3d. Algunas contribuciones en el uso del concepto y desarrollo matemático de la entropía en los estudios urbanos

Autor	Dominio específico	Aplicación y uso	Interpretación
Leopold y Langbein (1962)	Hidrología y geomorfología	Comprensión de las dinámicas hidrológicas y geomorfológicas en el paisaje.	Entropía máxima.
Batty (1974) y Wilson (1970)	Geografía	Análisis de la variabilidad y distribución espacial de personas y objetos en el terreno y el cálculo de su incertidumbre.	Tendencias y optimización en el desplazamiento y extensión urbanos.
Ayeni (1976)	Ecología urbana	Análisis de tiempos y movimientos en los patrones de flujo de información y de personas.	Estructura espacial urbana.
Bailey (1990)	Sociología	Definición de estándares de vida óptimos en situaciones de baja entropía en el contexto de los análisis sociológicos.	Vida de baja entropía.
Brown y Ulgiati, (1997)	Ecología industrial	Evaluación de los procesos ecológicos y tecnológicos en economías urbanas a diferente escala bajo el concepto de <i>emergía</i> .	Índice emergético de sostenibilidad.

(Continúa)

Autor	Dominio específico	Aplicación y uso	Interpretación
Fariña y Ruiz (2002)	Urbanismo	Medio ambiente urbano y proyecto de ciudad sostenible.	Entropía, orden y desorden urbano.
Stepanic <i>et al.</i> (2000)	Sociología	Cálculo de las posibilidades de comportamiento social urbano.	Posibilidades de estructuras y comportamiento humano.
Parisi (2002)	Economía	Estudio de los procesos de fragmentación y legalidad en el uso y propiedad de la tierra.	Dispersión en la tenencia y el dominio de la tierra.
Adams (2007)	Antropología	Termodinámica de la supervivencia para la sociedad humana.	El hombre crea entropía en el proceso de vida y muerte.
Ángel y Velásquez (2008)	Economía ecológica	Disertación sobre el uso de energías renovables para atender los requerimientos de las ciudades.	La termodinámica en el estudio ambiental urbano.
Fistola (2011)	Ecología urbana	Planeación ecológica urbana	Entropía e insostenibilidad urbana.
Martínez (2015)	Economía ecológica	Alerta y advertencia de una economía entrópica y no circular.	La termodinámica en el análisis de la sostenibilidad.
Purvis <i>et al.</i> (2016)	Ecología urbana	Entropía como indicador de la sostenibilidad urbana.	Eficiencia en la transformación y uso de la energía.

(Continúa)

Autor	Dominio específico	Aplicación y uso	Interpretación
Díaz y Pulecio (2016)	Economía ecológica	Isomorfismo potencial en la aplicación de las leyes de la termodinámica para los estudios de sostenibilidad ambiental.	Termodinámica, entropía y metabolismo urbano.
Perolosso <i>et al.</i> (2017)	Ecología urbana	Ciudades de baja entropía.	Termodinámica y entropía.

Fuente: elaboración propia con información de Ángel y Velásquez (2008), Ayeni (1976), Bailey (1990), Batty (1974), Brown y Ulgiati (1997), Cabral *et al.* (2013), Díaz y Pulecio (2016), Fariña y Ruiz (2002), Fistola (2011), Leopold y Langbein, (1962), Martínez (2015), Purvis (2016), Perolosso *et al.* (2017 y 2018), Stepanic *et al.* (2000) y Wilson (1970).

tica de eficiencia energética de Purvis, Mao y Robinson (2016), quienes calculan entalpías de reacción (H_r) en procesos de combustión para determinar la eficiencia en la conversión de energía. Trabajos que, en su mayoría, confunden la segunda ley con el axioma de la entropía.

Por otro lado y en cuanto a la existencia y uso de *software* para el cálculo de entropía en las ciudades, no se evidencia un programa de computador que permita una aproximación para este tipo de sistemas complejos. Naturalmente, en la singularidad de la ingeniería química o de procesos es fecunda la producción, ya que existen varios constructos que permiten realizar diagramas de equilibrio de fase, determinar propiedades de fluidos, efectuar cálculos complicados en termodinámica física y química y modelar sistemas multicomponentes en múltiples condiciones de equilibrio⁶⁷. También hay una variedad similar para el diseño de ciudades, principalmente en lo relacionado con la infraestructura, el flujo de información, el *big data*, la optimización de flujos, distribución de área y la relación ecosistémica⁶⁸.

3.5. Aproximación matemática a la entropía urbana

Con el fin de explicar el cambio del valor total de entropía en una ciudad, a continuación se presenta⁶⁹ un desarrollo matemático (ecuación 3i) que relaciona la variación de esta propiedad con la dinámica metabólica y configuración urbana a partir del planteamiento de máquina térmica compleja.

Así las cosas y como propiedad extensiva, la entropía total de una ciudad se puede calcular a partir de la suma de todas las entropías asociadas con cada uno de los subsistemas másicos urbanos y los alrededores que como totalidad pueden hallarse contenidos por una frontera suficientemente grande a través de la cual la transferencia de calor, el trabajo o la masa se considerarían despreciables.

Esta suposición inicial, propuesta por Cengel y Boiles (1994 y 2012), permite considerar a la ciudad y sus alrededores como dos

67 Algunos de estos son: Thermo-Calc® (Thermo-Calc Software, 2018), ProPhyPlus® (ProSim, 2018), Open Calphad® (Lukas *et al.*, 2007; OCG, 2018), Pandat® (Computherm, 2018) y SimulationX (ESI Group, 2018).

68 En esta categoría se pueden enunciar la propuesta de Ciudades Futuras de SAP (2018).

69 El autor de esta investigación es consciente de los riesgos que implica hacer esta propuesta de funcional matemático y las críticas al planteamiento y la disertación que pueden presentarse; por eso se llama una aproximación *pathfinder*.

macrosistemas que existen en un gran sistema aislado, como lo es la Tierra, donde el cambio de entropía resultante se puede obtener de la mencionada sumatoria.

$$\Delta S_{Total} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores} \quad \text{Ec. 3f}$$
$$\Delta S_{generada\ ciudad} = \Delta S_{interna1\ ciudad} + \Delta S_{interna2\ ciudad} + \Delta S_{externa\ alrededores} \quad \text{Ec. 3i}$$

Metabolismo Tratamientos

En cuanto a la entropía interna del sistema se refiere, su valor estará determinado por la estructura metabólica de la ciudad, expresada por el flujo de materiales que ingresan al sistema urbano (alimentos y bebidas, combustibles, agua, materiales de construcción, aseo personal y del hogar, etc.) y el consumo de energía eléctrica; así mismo, por la cantidad de personas que habitan la ciudad y la frecuentan, por el área urbana y construida, por el número de vehículos que transitan en los distintos ejes vehiculares y por la temperatura promedio en condiciones de frontera, principalmente.

Estos elementos sumarán al valor de entropía generada, mientras que los cuerpos de agua, los parques, prados y jardines y las zonas de reserva forestal, áreas de conservación urbana y protegidas —como zonas de disipación— contribuirán a que el cambio de entropía (ΔS) sea negativo⁷⁰ (tabla 3e, ecuación 3j).

$$\text{Entropía Interna 1} = f\left(m, E, P_p; A_c; A_{urb}; C_{H_2O}; A_{vZR}; T; V_{ehic}\right) \quad \text{Ec. 3j}$$

Tabla 3e. Principales elementos urbanos que contribuyen a la generación de entropía dentro de la ciudad^{(a)(b)}

Elemento de la ecuación	Símbolo	Signo	Unidades
Materia (<i>stock</i> y flujo)	M	+	t
Energía (flujo)	E	+	Gwh
Población	P _p	+	# Habitantes

(Continúa)

70 De nuevo se aprovecha esta oportunidad para aclarar que el cambio de entropía en un sistema puede ser negativo durante el proceso, pero la generación de entropía no.

Elemento de la ecuación	Símbolo	Signo	Unidades
Área construida	A_c	+	ha
Área urbana	A_{urb}	+	ha
Temperatura	T	+	K
Vehículos	V_{ehic}	+	#Vehículos
Área verde y zonas de reserva	A_{vZR}	–	ha
Cuerpos de agua	C_{H_2O}	–	ha

^(a) El signo negativo en la tabla evidencia que el elemento permite asimilar la cantidad de entropía, admitiendo que su valor disminuya a partir de la retroalimentación negativa o de su capacidad homeostática.

^(b) Desde el punto de vista de la rigurosidad termodinámica, debe considerarse la temperatura de frontera como expresión del calor diferencial que se transfiere entre el sistema y los alrededores

Fuente: elaboración propia.

Dentro del sistema urbano también se presentan cambios de entropía a causa de las emisiones, vertimientos, residuos sólidos y el ruido generado; de igual manera, por los grandes sistemas de tratamiento, como los rellenos sanitarios, vertederos, torres de depuración de aire y plantas de tratamiento de aguas residuales y servidas (ecuación 3k, tabla 3f).

$$Entropía\ Interna\ 2_{wastes} = f(e_m; v_t; r_s; r_d; S_{wt})$$

Ec. 3k

Tabla 3f. Principales elementos urbanos en la categoría de contaminación que contribuyen a la generación de entropía dentro de la ciudad

Elemento de la ecuación	Símbolo	Signo	Unidad
Emisiones	e_m	+	t
Vertimientos	v_t	+	m ³
Residuos sólidos	r_s	+	t
Ruido	r_d	+	Db
Sistemas de tratamiento	S_{wt}	+	Unidades

Fuente: elaboración propia.

Respecto a la entropía proveniente de los alrededores, se consideran principalmente el proceso de conurbación —expresado en función de área—, la población que habita dicha forma de expansión urbana, las zonas de reserva y conservación y la frontera agrícola extramuros de la ciudad (ecuación 3l, tabla 3g).

$$\text{Entropía Externa } 2 = f\left(C_{urb}; P_{ourb}; Z_{rva}; Z_{agro}\right) \quad \text{Ec. 3l}$$

Tabla 3g. Principales elementos de los alrededores urbanos que generan entropía al sistema ciudad^{(a)(b)}

Elemento de la ecuación	Símbolo	Signo	Unidades
Conurbano	C _{urb}	+	Ha
Población en el conurbano	P _{ourb}	+	#habitantes
Zonas de reserva	Z _{rva}	–	Ha
Zonas agrícolas	Z _{agro}	–	Ha

^(a) El signo negativo en la tabla evidencia que el elemento permite asimilar la cantidad de entropía, admitiendo que su valor disminuya a partir de la retroalimentación negativa o de su capacidad homeostática (conceptos vistos en el capítulo 2).

^(b) Para calcular la entropía es menester determinar la distancia lineal efectiva de influencia de los alrededores y del conurbano y los anillos de relación sobre la ciudad capital (radio cero, uno y dos, por ejemplo).

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, al considerar cada uno de los elementos incluidos en el análisis de la generación y asimilación de entropía en la ciudad, es necesario asegurar que sus unidades de medida sean similares para realizar la operación matemática de adición; por tal motivo, se propone un coeficiente sigma (ς) como *factor de aporte de entropía* (tabla 3h), con su respectiva unidad de conversión, expresada en dimensiones de energía (TJ) sobre temperatura (K) por la unidad del elemento de la actividad correspondiente (EA), de tal forma que la suma sea dimensionalmente consistente (ecuaciones 3m, 3n y 3o).

$$\begin{aligned} \text{Entropía}_i &= \text{Elemento Actividad}_i \times \varsigma_i \\ \text{Entropía}_i &= EA_i \times \varsigma_i \end{aligned} \quad \text{Ec. 3m}$$

Donde, EA: Elemento Actividad (v. g. # de vehículos, área urbanizada, etc.)
 ς_i : Factor de aporte de entropía

Siendo las unidades de ς_i :

$$\varsigma_i \equiv \left(\frac{\text{kJ}}{\text{K. unidad de EA}} \right) \quad \text{Ec. 3n}$$

De tal forma que dimensionalmente la ecuación 4m es:

$$\text{Entropía}_i \equiv \text{unidad de EA} \times \frac{\text{kJ}}{\text{K. unidad de EA}} \equiv \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad \text{Ec. 3o}$$

De esta manera, el valor del cambio de entropía en el sistema complejo, expresado en unidades de energía y temperatura (kJ/K), será igual a la suma de los aportes parciales de entropía, expresados en las mismas unidades (kJ/K) gracias al uso del factor de aporte de entropía, expresado como coeficiente sigma (ς).

Finalmente, el funcional matemático concebido para calcular la entropía generada en una ciudad y el aporte del conurbano se expone en la ecuación 3p con el nombre de *ecuación Sigma S*, en la cual se incluye —por principio de incertidumbre— un elemento adicional de error (ϵ) que reconoce las restricciones que se producen en la medición de las variables, el cálculo y la asimetría de la información.

Ecuación Sigma S:

$$\Delta S_{\text{generada ciudad}} = \Delta S_{\text{interna1 ciudad Metabolismo}} + \Delta S_{\text{interna2 ciudad Tratamientos}} + \Delta S_{\text{externa alrededores}} + \epsilon \quad \text{c. 3p}$$

Donde:

$$\Delta S_{\text{interna1 ciudad}} = \varsigma_m \cdot m + \varsigma_E \cdot E + \varsigma_P \cdot P_p + \varsigma_A \cdot A_c + \varsigma_A \cdot A_{\text{urb}} + \varsigma_T \cdot T + \varsigma_V \cdot V_{\text{ehic}} - \varsigma_C \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} - \varsigma_A \cdot A_{\text{vZR}} \quad \text{Ec. 3q}$$

$$\Delta S_{\text{interna2 wastes}} = \varsigma_e \cdot e_m + \varsigma_t \cdot v_t + \varsigma_r \cdot r_s + \varsigma_{rd} \cdot r_d + \varsigma_{\text{Swt}} \cdot S_{\text{wt}} \quad \text{Ec. 3r}$$

$$\Delta S_{\text{externa alrededores}} = \varsigma_{\text{Curb}} \cdot C_{\text{urb}} + \varsigma_{\text{Pconurb}} \cdot P_{\text{ourb}} - \varsigma_{\text{Zrva}} \cdot Z_{\text{rva}} - \varsigma_{\text{Zagro}} \cdot Z_{\text{agro}} \quad \text{Ec. 3s}$$

Tabla 3h. Símbolos, coeficientes sigma⁷¹ y unidades de los elementos considerados en este estudio que generan la disipación o coadyuvan en ella

Elemento de la ecuación	Símbolo	Signo	Unidades	Coeficiente	Unidades
Materia (<i>stock</i> y flujo)	M	+	t	ς_M	kJ/ t. K
Energía (flujo)	E	+	Gwh	ς_E	kJ/ Gwh. K
Población	P _p	+	# Habitantes	ς_{pp}	kJ/ #Habitantes. K
Área construida	A _c	+	ha	ς_{Ac}	kJ/ ha. K
Área urbana	A _{urb}	+	ha	ς_{Aurb}	kJ/ ha. K
Temperatura	T	+	K	ς_T	kJ/ K
Vehículos	V _{ehic}	+	#Vehículos	ς_{vehic}	kJ/ #Vehículos. K
Área verde y zonas de reserva	A _{vZR}	-	ha	ς_{AVZR}	kJ/ ha. K
Cuerpos de agua	C _{H2O}	-	ha	ς_{CH2O}	kJ/ ha. K
Emisiones	e _m	+	t	ς_{em}	kJ/ t. K

(Continúa)

71 Un desarrollo posterior de la investigación permitirá determinar los valores de los diversos factores de aporte de entropía por cada elemento de actividad.

Elemento de la ecuación	Símbolo	Signo	Unidades	Coefficiente	Unidades
Vertimientos	V_t	+	m^3	ς_{vt}	$kJ/ m^3 \cdot K$
Residuos sólidos	r_s	+	t	ς_{rs}	$kJ/ t \cdot K$
Ruido	r_d	+	Db	ς_{rd}	$kJ/ Db \cdot K$
Sistemas de tratamiento de residuos	S_{wt}	+	#Unidades	ς_{swt}	$kJ/ \#Unidades \cdot K$
Conurbano	C_{urb}	+	ha	ς_{Conurb}	$kJ/ ha \cdot K$
Población en el conurbano	P_{conurb}	+	#habitantes	ς_{conurb}	$kJ/ \#habitantes \cdot K$
Zonas de reserva	Z_{rva}	-	ha	ς_{Zrva}	$kJ/ ha \cdot K$
Zonas agrícolas	Z_{agro}	-	ha	ς_{agro}	$kJ/ ha \cdot K$

Fuente: elaboración propia.

Se espera que el funcional *ecuación Sigma S* (llamado así por el autor) permita⁷² dimensionar la cantidad de entropía que se genera en una ciudad e identificar los elementos generadores de esa energía no útil que es necesario disipar y gestionar dentro de la urbe o en sus alrededores.

3.6. La gestión de la entropía urbana y el aumento de disipación

Considerando que la producción de entropía contiene —según la dialéctica— un elemento creador de desorden y otro creador de orden (Prigogine, 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 del valor de esta propiedad termodinámica (figura 4e). Algo que no se ha considerado en los planes de mejoramiento, planeación y desarrollo urbanos y mucho menos en el ideal de sostenibilidad, porque, ante los desequilibrios causados por la urbanización, el gobierno de la ciudad latinoamericana habitualmente tiende a liberar las tensiones aumentando la escala de desarrollo a todo el territorio o desplazando el problema ambiental a otro lugar (Agulles, 2017), es decir, relocalizándolo (tabla 3i).

Dichas actividades se concentran en transferir el problema a otro territorio, reubicar el contaminante, cambiarle de fase/estado (llevándolo de sólido a líquido, por ejemplo), deshacerse rápidamente del material, la especie química o la forma de energía, abandonándolos en zonas deprimidas y lotes baldíos o enterrándolos muchas veces sin criterio técnico alguno, lo que en términos de la economía ambiental se considera como una externalidad negativa⁷³. Simplemente, la ciudad capital latinoamericana acumula contaminantes o los relocaliza en su interior o alrededores, y les transfiere así el problema a otros sin consulta previa, en la mayoría de los casos.

72 Según el *Diccionario Akal de matemáticas*, un funcional es una aplicación lineal de un espacio funcional en otro (Bouvier y Georger, 2005, p. 360), en el que los espacios vectoriales topológicos son funciones; es decir, una función de funciones, lo cual se ha demostrado en las ecuaciones 4q, 4r y 4s.

73 Una externalidad negativa se define como un efecto externo —producto de la rigidez del mercado— que sufre un tercero por acciones u omisiones de otro y que no se refleja en los precios; lo que implica que los beneficios o costos directos de una actividad no reflejen todos los costos totales de esta (Delacámara, 2008).

Tabla 3i. Formas de relocalización de las expresiones del desorden urbano

Históricamente, las ciudades han tratado de relocalizar inadvertida o deliberadamente las expresiones del desorden urbano, implementando acciones como, las siguientes, que son la más comunes:

1. Conducir las aguas servidas y demás vertimientos a través de sistemas de alcantarillado, para después entregarlas a cuerpos de agua receptores.
2. Recoger y conducir los residuos sólidos a zonas próximas al casco urbano, para su disposición final o incineración.
3. Liberar al aire los gases contaminantes esperando que estos se diluyan, o
4. Dejar pasivos ambientales a la espera de que la naturaleza haga su trabajo de remediación.

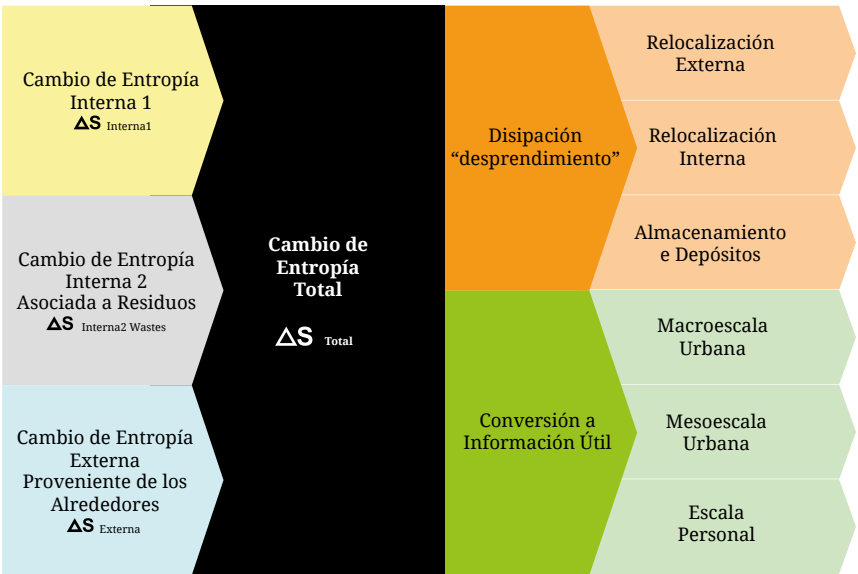
Hoy día, dichas prácticas se mantienen con la variación de contar con estudios de impacto ambiental (EIA) y en muy pocas ocasiones se logran modificar los procesos generadores del problema para prevenir parcialmente la contaminación.

Fuente: elaboración propia.

Por tal motivo, la prevención y el control de la contaminación se han convertido en imperativos categóricos dentro de los planes urbanos de sostenibilidad ambiental. Lamentablemente, toda la técnica, la tecnología, los recursos financieros, los materiales, la energía y el talento humano que se destinan para mejorar el desempeño ambiental sucumben ante la paradoja termodinámica de aumentar el desorden al intentar producir una nueva estructura ordenada (Brown, Lemay y Bursten, 1991, p. 753). Esta situación se exacerba por la ineficiencia de la máquina térmica urbana, cuyo consumo de trabajo (W) supera su capacidad de producción y de metabolización (Agulles, 2017, p. 54), razones que demuestran la existencia de unos límites termodinámicos para la expansión de las ciudades (Tyrtania, 2009, p. 119).

Esta realidad, que rige todo constructo de origen antrópico, expone el siguiente contraste urbano: unas pocas localidades, barrios o zonas alcanzan una gran cualificación urbanística y calidad ambiental, mientras que las áreas restantes —la mayoría— terminan afectadas

Figura 3e. Gestión de la entropía urbana



Fuente: elaboración propia.

y degradadas al ser receptoras de las externalidades negativas. Así, esta diferenciación urbana, social y ambiental provoca tensiones, conflictos y desequilibrios en su interior, en la frontera y con los municipios aledaños, en los cuales se concentran las principales áreas deterioradas, zonas de disposición final de residuos, asentamientos ilegales en terrenos de alto riesgo o proyectos constructivos legales en zonas de reserva o en terrenos agrícolas.

Pero no todo es malo ya que la ciudad convierte parte de esta entropía en información útil⁷⁴. Este axioma termodinámico fácilmente se valida en los sistemas colaborativos cognitivos (JCS, por sus siglas en inglés)⁷⁵ (expuestos en el capítulo 1) y en la naturaleza, en los cuales se logra un aumento de información, justamente en el lugar

74 Este planteamiento se ampara en los postulados de Arie Ben-Naim (2011), que interpreta la entropía a partir de la cantidad de información perdida en el sistema. Entropía, información y probabilidad están relacionados íntimamente en la termodinámica atomista.

75 A esta altura del texto, es menester recordar que un JCS se define como un sistema complejo que continuamente modifica su comportamiento y estructura —a partir de la experiencia—, con el objeto de alcanzar un estado de baja entropía (Díaz y Pulecio, 2018; Hollnagel y Woods, 2005).

donde esta era mayor en un principio (Margalef, 1986), a saber: 1) la estructura social, la calidad de vida, el conocimiento aplicado, las creaciones e innovaciones y los depósitos de datos e información (como las bibliotecas, bases de datos y el *big data*) son un reflejo de este aumento a una macro escala; 2) los indicadores de gestión, los productos académicos, las publicaciones, los procesos, procedimientos y marcos normativos dan fe de este axioma en la escala meso-; 3) la cualificación profesional y personal, la experiencia acumulada, la ganancia de competencias duras y blandas y, sobre todo, la capacidad para resolver problemas, para una escala micro- y 4) los distintos niveles tróficos que existen en diversidad de relaciones ecosistémicas, para el caso exclusivo de la naturaleza (Bergström, 2012; Díaz y Pulecio, 2018).

Esta cualificación del sistema complejo urbano y de sus habitantes puede obtenerse por dos vías principales, a saber: 1) con la destinación ilimitada de recursos para rápidamente lograr el cambio esperado o 2) innovando en casos restrictivos de financiamiento, personal, tiempo y recursos. Ambas, en teoría, deberían generar información útil, viabilizar la vida⁷⁶ y cualificarla en el espacio tiempo.

3.7. Supervivencia urbana y sostenibilidad ambiental

Puesto que la supervivencia de un ciudad o asentamiento humano depende de la energía disponible y de la eficiencia para convertirla en información útil, es evidente que en la línea irreversible del tiempo la máquina térmica urbana tendrá más dificultades para sostener la vida humana —como la conocemos— a medida que se agoten las fuentes disponibles y se incremente el valor de la entropía. En términos termodinámicos, cada vez se requerirá ejercer más trabajo en un sistema que, con el pasar del tiempo, agotará las principales y más económicas fuentes de energía disponible, sufrirá de obsolescencia en su infraestructura de transporte y servicios, acumulará más desorden, será menos productivo, estará más inundado de desperdicios y presentará déficits en el *stock* de materia útil.

76 De acuerdo con el autor de esta investigación, la vida se considera como la emergencia de un sistema fisicoquímico alejado del equilibrio, que es capaz de sostenerse a sí mismo gracias a la transferencia de materia, energía e información y a la disipación de entropía en su interior y alrededores, que experimenta la evolución darwiniana y que se alimenta del aliento divino.

Las leyes de la termodinámica —incluso el postulado de Georgescu Roegen— nos advierten que, en cuanto a la energía y materia disponible, cada vez que la máquina térmica compleja cambia de estado, la supervivencia de la ciudad se vuelve más dura y estricta que en el anterior estado, principalmente porque la energía se disipa hasta alcanzar niveles más bajos y porque el *stock* de materiales útiles siempre disminuye en el tiempo (Carpintero, 2006; Rifkin, 1990). Por esto, además de promover un ritmo del consumo urbano más austero y fortalecer la homeostasis del sistema, es un imperativo categórico gestionar el “desorden” que se genera a diario, de tal manera que se alcancen ciudades ambientalmente sostenibles.

Así pues, la *sostenibilidad ambiental urbana*, como concepto, se perfeccionaría con los aportes de esta investigación, dado que se incluiría el concepto de la *entropía*. Pasaría de entenderse como una mera capacidad para satisfacer las necesidades humanas de sus habitantes en una relación no destructiva con la naturaleza, al respetar sus límites de regeneración y capacidad de carga a favor de las generaciones futuras (PNUD, 2018; UMD, 2020; Zarta, 2018), a una condición de pseudoestabilidad entre tres sistemas complejos: la cultura, la vida y la ciudad, en la que esta operaría con una baja generación de entropía (Evans, 2019; Hawken, 2017).

4. Ciudades del futuro

Considerando que la sostenibilidad ambiental urbana se puede definir en términos de entropía, que la retroalimentación, la homeostasis y la disipación son tres mecanismos de respuesta ante la continua perturbación asociada a los flujos M/E/I; que dichos flujos se pueden cuantificar en un contexto social, político, económico y ambiental —y de manera agregada— bajo el concepto de *metabolismo urbano* y que una aproximación termodinámica al sistema complejo urbano permitió construir el funcional matemático Sigma S, con el cual se puede calcular un valor de entropía en la ciudad al considerar su estructura física y metabólica, a continuación se proponen alternativas urbanas para el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible n.º 11 de la Naciones Unidas⁷⁷, en función de una operación urbanorregional sustentable.

4.1. Ciudades de baja entropía⁷⁸

Aunque es evidente que varios ODS están íntimamente relacionados con las ciudades y exigen especial atención para dar fin a la pobreza (ODS1), finiquitar el hambre (ODS2), garantizar una vida sana

77 Este ODS establece las siguientes metas para el 2030 (UN, 2018): 1) asegurar el acceso de todas las personas a *viviendas y servicios básicos adecuados*, seguros y asequibles, y mejorar los barrios marginales; 2) proporcionar acceso a *sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles* para todos y mejorar la seguridad vial, en particular ampliando el transporte público y prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad; 3) aumentar la *urbanización inclusiva y sostenible* y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países; redoblar los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo; 4) *reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres*, incluidos los relacionados con el agua y de personas afectadas por ellos y reducir de forma considerable las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial; 5) *reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades*, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo; 6) proporcionar *acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles*, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad; 7) apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las *zonas urbanas, periurbanas y rurales* fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional; 8) aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica la *gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles*; y 9) proporcionar apoyo a los países menos adelantados, incluso mediante asistencia financiera y técnica, para que puedan construir *edificios sostenibles y resilientes* utilizando materiales locales.

78 Esta propuesta puede encontrarse con mayor detalle en Díaz-Álvarez (2023).

(ODS3); garantizar una educación equitativa, inclusiva y de calidad (ODS4), lograr igualdad entre los géneros (ODS5), garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible (ODS6); asegurar el acceso a una energía sostenible, asequible y segura (ODS7), promover el crecimiento económico sostenido (ODS8), reducir las desigualdades (ODS9), construir infraestructuras resilientes (ODS10), garantizar modalidades de consumo y producción sostenible (ODS12), adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático (ODS13), conservar y utilizar sosteniblemente los océanos (ODS14), detener e invertir la degradación de tierras (ODS15) y promover sociedades justas (ODS16), es importante tener presente que el incremento de entropía puede llevar al colapso total o parcial urbano, aunque estas metas tengan un efecto en cascada favorable para sus habitantes.

En consecuencia y llevando el discurso al argot del gobierno urbano, una ciudad de baja entropía podría ser viable si se adoptaran políticas, planes, programas y proyectos enfocados en fortalecer los tres mecanismos de respuesta que se han mencionado, propiamente en los siguientes frentes de trabajo: 1) alcanzando un crecimiento cero, renovando e insertando cabalmente la naturaleza en la urbe; 2) estabilizando la población; 3) racionalizando el consumo agregado y per cápita; 4) aprovechando los residuos y definiendo estructuras de flujo bajo la lógica de un metabolismo circular; 5) gestionando la entropía y compensando a la población que paga el precio termodinámico de la existencia urbana y 6) modificando el pensamiento lineal en la gestión ambiental urbana para llegar a lógicas complejas. Este cúmulo de acciones promoverán un cambio de mentalidad individual y colectivo sobre la vida urbana, al darle un nuevo significado (Díaz, 2023).

El reto de estabilizar a la población debe asumir dos grandes dimensiones demográficas: el crecimiento vegetativo de la población y la migración. En cuanto al primero, es importante reiterar que el mantenimiento y promoción de políticas públicas de control natal⁷⁹

79 Aunque parte de los jóvenes reconocen el enorme costo de oportunidad que se incurre al procrear antes de tiempo o sin planeación alguna, hay que brindar oportunidades para que las futuras familias no se formen de repente o sin un plan de vida, razón por la cual los programas de salud reproductiva de hombres y mujeres deben acompañarse de calidad de vida, inteligencia emocional y la familia; y totalmente distantes de intereses de grupos dominantes e intereses de clase (Díaz, 2023; Chávez, 2014; García, 2015).

siempre será una buena inversión en el futuro en economías que presentan altos porcentajes en la línea de pobreza y pobreza extrema, como son las latinoamericanas.

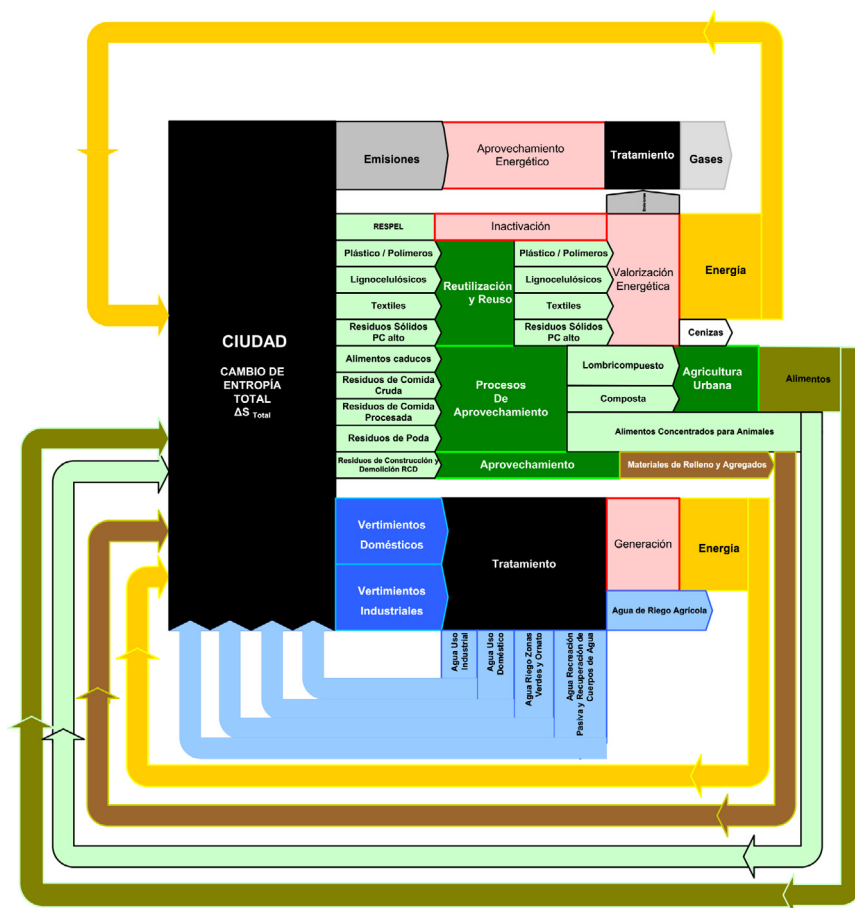
Sin embargo, el mayor desafío está en el crecimiento no vegetativo (por migración) ya que estas economías regionales siguen siendo atractores de población a causa de las escasas oportunidades y carencia de servicios en las regiones y a crisis internacionales asociadas a los conflictos armados, el cambio climático o *meltdown* de economías. Este drama humanitario en estos momentos azota a Bogotá, Ciudad de México, Quito, Lima y Santiago —y ciudades intermedias de sus respectivos países—, que lamentablemente han incrementado las cifras de criminalidad, pobreza y desplazamiento y a la vez llevan al límite los sistemas de protección social en las respectivas economías (ACNUR, 2018).

La definición del concepto de *capacidad de carga urbana* —similar a la capacidad de carga de los ecosistemas estratégicos— podría dar cuenta del metabolismo urbano óptimo, del potencial rendimiento decreciente por unidad marginal de habitante (ley de rendimientos decrecientes) y los costos reales de la urbanización⁸⁰. Al final de cuentas, el crecimiento urbano por causa de las tasas positivas de natalidad y la migración deberá compartirse con ciudades emergentes adecuadamente planificadas en otras regiones de cada país, permitiendo así una circulación de capital y el adecuado uso del espacio urbano en zonas que necesitan o tienen la capacidad de lograr una urbanización con industrialización de bajo impacto ambiental (Díaz, 2023).

Adicional a la preocupación por el número de habitantes está la lógica del consumo. Por tal motivo, es una tarea gestionar de forma adecuada los flujos de materiales y formas de energía que entran a una ciudad, se distribuyen en ella y salen de allí, con el objeto de aumentar los rendimientos o reducir los costos al menor gasto termodinámico posible.

80 Ejemplo de esto son los estudios realizados sobre las ciudades y condados del Reino Unido (MKC, 2017), La Paz, México (Moreno, 2016) y de algunos asentamientos humanos en la región de Coquimbo (Chile) (Cortés, 2009); así mismo, la iniciativa de Densificación Urbana Inteligente de México (Fundación IDEA *et al.*, 2014), que plantea el agua potable, el drenaje urbano, la energía eléctrica, la red vial y el equipamiento urbano como los principales elementos y umbrales para la definición de la capacidad de carga de la ciudad.

Figura 4a. Propuesta de metabolismo circular en las ciudades latinoamericanas



Fuente: elaboración propia.

Así mismo, propender a la racionalización del consumo agregado per cápita y una adecuada logística de los flujos de materia y energía, de tal manera que se reduzca el desperdicio de alimentos⁸¹. También debe procurarse la drástica reducción de los consumos suntuarios de

81 Es conveniente definir estrategias para el aprovechamiento de productos próximos a vencerse. El caso más representativo es el Banco de Alimentos de Bogotá, iniciativa de la Arquidiócesis y el sector privado, que con fundamento evangélico y visión empresarial, logró entregar en 2018 más de 13.800 toneladas de comida a 1129 organizaciones beneficiadas que auxilian a los más necesitados de la capital colombiana y su conurbano (Banco de Alimentos, 2018).

la energía y promover mercados viables de generación distribuida en el sector doméstico y comercial, amparándose en los recientes marcos normativos expedidos⁸² en la Región de las Américas. De igual manera, promover los distritos térmicos (UNODI, 2023), que aumentan la eficiencia energética y el abastecimiento en los sectores productivos y de servicios.

Finalmente, el metabolismo urbano debe tender a la circularidad ya sea con la lógica de la producción más limpia o de la economía circular (figura 4a), no solo para reducir la presión sobre los sistemas de abasto y provisión, maximizar la vida útil de los materiales y disipar la menor cantidad de entropía a los alrededores, sino para abrir nuevos mercados asociados con la mitigación de emisiones, recuperación de residuos, tratamiento y reutilización de aguas residuales y demás acciones que ayuden a mejorar el desempeño ambiental de las ciudades⁸³.

82 Colombia cuenta con la Resolución de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) 030 de 2018, en la que se reglamenta el procedimiento para que los usuarios puedan producir energía y vender sus excedentes al Sistema Interconectado Nacional. México tiene las Disposiciones Administrativas de Carácter General de la Comisión Reguladora de Energía. Perú, por medio de la Osinergmin, cuenta con el Decreto Legislativo 1221, que mejora la regulación de la distribución de electricidad para promover el acceso a la energía eléctrica. La Ley de Generación Distribuida 20/571 de 2017 y la 27.424 de 2017 son los congéneres para Chile y Argentina, respectivamente.

83 Así las cosas, y a manera de ejemplo, se propone que las aguas servidas no solo se traten en su totalidad, sino se reinyecten —en su mayoría— al sistema urbano para uso doméstico, ornato, recreación pasiva, recuperación de cuerpos de agua y uso industrial; y en el conurbano y la región para la generación hidráulica de energía eléctrica y la agricultura (figura 5a). Esta idea se lleva a cabo de forma parcial en ciudades como Bogotá (agua para riego y generación de energía eléctrica) y México (agua para riego), y con un mayor alcance y magnitud en Las Vegas y el Condado Clark (Nevada) (LVVWD, 2018), cuyo sistema de reciclaje logra tratar y reinyectar casi toda el agua residual en la ciudad. En cuanto a los residuos sólidos, se deben promover estrategias de economía circular (Minambiente, 2019) para alimentar distintos procesos industriales y agroindustriales. Restos de construcción y demolición (RCD), alimentos crudos y procesados residuales o caducos y residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE) tienen un enorme potencial de reutilización como materiales de relleno, materia prima para la elaboración de concentrados para animales y compost, e insumos para industria de alta tecnología, respectivamente. Por su parte, los materiales lignocelulósicos, polímeros/plásticos, textiles y otros residuos agotados con alto poder calorífico pueden ser valorizados energéticamente en usinas para la generación de energía eléctrica, al ser excelentes combustibles “cuasirrenovables” gracias a su alta tasa de generación urbana. En este tipo de emplazamientos también pueden tratarse una gran variedad de residuos peligrosos (Respel), en virtud de las altas temperaturas de incineración que se alcanzan. En este aspecto, Ciudad de México será vanguardista al lograr aprovechar el poder calorífico de sus basuras con la primera planta termovalorizadora de América Latina, que generará 965 GWh/año con una inversión de 600 millones de dólares (Banobras, 2018). Finalmente, en cuanto a metales, el vidrio y otros residuos recuperables, se deberán seguir alimentando los procesos de recuperación y aprovechamiento que ya existen.

Estas acciones sin duda exigirán la reconstrucción del andamiaje urbano, no solo su infraestructura, sino de sus relaciones internas y con la región; así mismo, el ordenamiento —en términos termodinámicos— del sistema, a la espera de que la entropía que existe sea muy inferior a la máxima alcanzable y, finalmente, en casos extremos que ya se están viendo en el planeta, la construcción de nuevas ciudades.

4.2. Reconstrucción y ordenamiento

Al hablar de ordenamiento es menester aclarar que no se está considerando el orden determinista que, entre la esquizofrenia y la ilusión, produce instrumentos de gestión territorial como los planes de ordenamiento territorial (POT), esquemas de ordenamiento territorial (EOT), planes básicos de ordenamiento territorial (PBOT) y otros que atosigan a la Administración municipal. Pensar en un orden estático y de equilibrio es desconocer la realidad compleja urbana, razón por la cual el orden que se plantea es el termodinámico.

Este orden se define no en lo estático y en la colocación de las personas, sectores económicos, funciones, infraestructura y servicios en el aparente lugar que le corresponden (RAE, 2024), sino en la relación entre entropías: la que existe en el sistema y la máxima alcanzable (ecuación 4a). La primera es la que produce el sistema complejo urbano y cuyo valor se obtiene a partir de la ecuación Sigma S; por su parte, la máxima alcanzable es la potencial que podría llegar a tener el sistema dentro de sus límites homeostáticos, la cual depende, además, del tamaño del sistema (Landsberg, 1986)

$$\text{Desorden} \equiv \frac{\text{Entropía existente}}{\text{Entropía máxima alcanzable}} \equiv \frac{\Delta S_{\text{generada ciudad}}}{\Delta S_{\text{máximo alcanzable}}} \quad \text{Ec. (4a)}$$

Es decir, el desorden urbano es una relación entre lo real y lo posible, lo que anima más a la contención en el consumo de M/E/I y en la expansión urbana. Sin embargo, inadvertidamente los gestores urbanos mantienen un desorden “aceptable” urbano al ampliar las áreas urbanizables de una ciudad, porque, al aumentar el tamaño de esta, el valor de la entropía máxima alcanzable aumenta (un aumento en el valor del denominador de la ecuación 4a producirá un menor valor como resultado numérico).

Así las cosas, la contención obligada, como la que experimentan las ciudades Estado, como Singapur, Malta, Ciudad del Vaticano, San Marino y los principados de Mónaco y Liechtenstein, o la consensuada al establecer unos límites⁸⁴ fijos al crecimiento y fomentado la circunvalación y contravalación urbana con áreas verdes, suelos agrícolas, áreas de reserva forestal y conservación (Díaz, 2023), sin duda coadyuvarán al sostenimiento ambiental urbano. Esta autoinducida y deliberada limitación a la urbanización en horizontal es, además, una “lucha política de primer orden, porque en ella se juegan las condiciones no ya de cierto grado de libertad, sino de su posibilidad misma” (Argulles, 2017, p. 55).

Esta contención, complementada con una reconstrucción urbana mediante procesos de renovación de áreas construidas degradadas, guetos y tugurios⁸⁵, permitirá crear valor a partir del uso del suelo urbano, procurando no aumentar desproporcionadamente los costos de alquiler o habitacional de los espacios transformados (*gentrificación*) ni forzando procesos centrífugos producidos del frenesi, la especulación en los precios y la marca urbana, que expulsen a las personas hacia la periferia, fuera de la realidad física (*desgentrificación*) en distintas ciudades del mundo (tabla 4a).

84 Tal como lo ha hecho Vancouver (Canadá), que frenó su expansión horizontal, protegiendo sus áreas de conservación, fomentando el repoblamiento de especies salvajes y aumentando las zonas verdes y parques, lo que la convirtió en una de las ciudades más ecológicas del mundo (City of Vancouver, 2018).

85 Ejemplos exitosos de esta nueva producción urbana han sido la recuperación de favelas en Río de Janeiro (2008 a 2016) para mejorar el centro ampliado de la ciudad y realizar un urbanismo a favor de los pobres (Regalado, 2012; Ricotta, 2017; Saborio, 2017); la revitalización y usufructo de las praderas urbanas, casas derruidas y edificios vacíos y abandonados del centro de Detroit (2008-actualidad) con posterioridad a la bancarrota municipal más grande en los Estados Unidos de América del Norte (Ager y Lawrence, 2015; Owens III *et al.*, 2018) y el rediseño natural de vías abandonadas del ferrocarril en Nueva York (2009) (Volner, 2017).

Tabla 4a. Algunos proyectos urbanos que se han llevado a cabo para alcanzar crecimiento cero en horizontal de área urbana, renovación urbana e inserción de la naturaleza

Categoría	Ciudad	Proyecto	Descripción
Límites naturales al área urbana.	Vancouver (Canadá).	Establecimiento de límites con zonas de amortiguamiento.	Aumento de áreas de conservación, repoblamiento de especies y aumento de áreas verdes.
Renovación urbana.	Río de Janeiro (Brasil).	Recuperación de favelas.	Intervención municipal para mejorar el centro ampliado y realizar un urbanismo a favor de los pobres.
	Detroit (EE. UU.).	Recuperación económica e inmobiliaria.	Mejoramiento del centro, uso de las praderas urbanas y viviendas derruidas.
	Nueva York (EE. UU.).	Revitalización de un área urbana.	Construcción del High Line Park.
Inserción efectiva de la naturaleza.	Cleveland y Akron (EE. UU.).	Definición de un área verde entre las redes urbanas.	Recuperación del río Cuyahoga.
	Seúl (Corea del Sur).	Creación de espacio público.	Saneamiento y adecuación del río Cheonggyecheon.
	Berlín (Alemania).	Creación de espacio público.	Adecuación del antiguo aeropuerto de Tempelhoff.
	San Francisco (EE. UU.).	Creación de un parque urbano.	Aprovechamiento del abandonado emplazamiento militar y la prisión de Alcatraz.
Reubicación de asentamientos humanos.	Bogotá (Colombia).	Reducción del riesgo por deslizamiento.	Reubicación del barrio Altos de la Estancia.

Fuente: elaboración propia con información de: Ager y Lawrence (2015), Alcaldía Mayor de Bogotá (2014), City of Vancouver (2018), Hickel (2016), Owens III *et al.* (2018), Regalado (2012), Ricotta (2017), Saborio (2017), SDP (2015) y Volner (2017).

Reiterando que la naturaleza es la única capaz de convertir la entropía en información útil, la ciudad del futuro inevitablemente deberá insertar de forma efectiva el mundo natural en la creciente artificialidad construida. Como opciones están la habilitación de parques urbanos de gran envergadura, la habilitación de áreas de reserva natural y el aumento en el número de cuerpos de agua natural o artificial no contaminados a partir de la recuperación y uso de lotes baldíos, parcelas de pastizales, plantaciones boscosas, derruida infraestructura y abandonados emplazamientos industriales⁸⁶.

Por último, es importante incluir en este acápite la reconstrucción o reubicación de asentamientos subnormales, ilegales o que se encuentren en zonas de alto riesgo natural o antrópico⁸⁷.

86 Proyectos urbanísticos como los del río Cuyahoga (1974) en el parque nacional Valle Cuyahoga, entre las redes urbanas de Cleveland y Akron (EE. UU.), y la franja de agua que define el saneado río Cheonggyecheon (2005) en Seúl (Corea del Sur) demuestran que el agua puede ser el principal eje articulador del territorio. Así mismo, la adecuación del antiguo aeropuerto de Tempelhof de Berlín (2010), para convertirse en un parque urbano, y las emblemáticas áreas recreativas nacionales de Golden Gate (1972) y Presidio (1996), en San Francisco (EE. UU.), han permitido una buena yuxtaposición entre el trajín de la ciudad y el descanso al aire libre, lo cual demuestra que traer el mundo natural a la gente es una excelente idea (Hickel, 2016).

87 Altos de la Estancia, en Bogotá, el mayor fenómeno de deslizamiento de tierras urbanas en Latinoamérica, con 73,8 hectáreas, es un ejemplo de intervención para la reducción de riesgo y posterior uso para recreación pasiva de la población (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014; SDP, 2015).

Conclusiones

- A partir de las propuestas de ciudad como sistema vivo (Díaz, 2014; Díaz y Pulecio, 2016), superorganismo urbano (Zhang, 2009a y 2009b), organismo cibernético (Swyngedouw, 2006), sistema complejo y dinámico (Newman, 1999), área metropolitana viviente (Moore, 2007), sistema insumo-producto (Adams, 2007) o sistema complejo (Reynoso, 2010), entre otras metáforas expuestas en los capítulos 1 y 2, se logró demostrar que la ciudad es un sistema complejo, cumpliendo así con el primer objetivo específico de la investigación. La susceptibilidad a las condiciones de frontera y del conurbano, la región y la globalidad planetaria, el efecto que sobre esta ejercen las creencias y relaciones comunitarias de sus habitantes, así como las dinámicas económicas, política, ambiental y cultural del país que representa, son características que validan esta definición. También la heterogeneidad de sus elementos bióticos y abióticos naturales y antrópicos, su alta sensibilidad a las condiciones iniciales que dieron los respectivos pueblos originarios y la historia dada por los hechos y decisiones tomadas durante su fundación y devenir.
- Los trabajos de Meadows, Meadows y Randers (1992) con respecto al modelo World 3; Lovelock (1995) y Watson y Lovelock (1983), con Deisy World; Barnsley (2007), con la teoría Gaia; Bertalanffy (1994), con su TGS; Roughgarden y Smith (1996), con su modelo Verhulst, y Heavens, Ward y Mahowald (2013), con su Modelo Integrado de Sistemas de la Tierra, expuestos en el capítulo 1, entre otros autores, permiten enunciar que la pseudoestabilidad de un sistema complejo depende de las funciones de relación entre los elementos que lo constituyen, que dentro de unos límites máximos y mínimos de seguridad estructural logran una condición de estado determinada, la cual se mantiene por acción de la homeostasis y las retroalimentaciones negativas.
- El isomorfismo propuesto entre el fenómeno del amortiguamiento y la regulación de las perturbaciones M/E/I en los sistemas complejos permite una aproximación matemática desde la ley de Hooke y la segunda ley de Newton para demostrar el efecto de la retroalimentación negativa y de la homeostasis

en el esfuerzo urbano de mantener estados pseudoestables. El logro de un objetivo de la investigación se alcanzó con el siguiente símil: masa (m) suspendida en el resorte es a perturbación en el sistema, lo que la fuerza de restitución del resorte (k) es a retroalimentación negativa; así mismo, lo que el amortiguamiento es a homeostasis.

- El desarrollo matemático propuesto para explicar el amortiguamiento urbano, desde las ecuaciones diferenciales de segundo orden y su posterior expresión gráfica, demuestran que el continuo flujo M/E/I en un sistema complejo (cada uno con una magnitud y tiempo diferente) lo separan ininterrumpidamente del equilibrio provocando una continua oscilación dentro de los límites homeostáticos que, al exacerbarse, puede sobrepasar la homeostasis y desgastar su servocontrol, lo que se traduciría en una bifurcación en su devenir histórico que cambiaría completamente su condición inicial.
- La ciudad pseudoestable —al estar alejada del equilibrio— depende enormemente de la magnitud y estructura de los ciclos biogeoquímicos y los flujos de materia, energía, información y dinero, así como de su forma de administración urbana, del esquema de consumo y estrategia de gestión de los desechos generados y, naturalmente, de la generación y obligada gestión del desorden, entre otros aspectos.
- Desde el punto de vista histórico, el gobierno urbano de las nacientes ciudades capitales estudiadas (Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Ciudad de México, Lima y Santiago) fluctuó en función del orden social o mediático hegemónico en los distintos momentos de su agitada existencia: desde el autonomista, el republicano centralista, el federalista, el imperio, el centralismo subordinado a los gobiernos provinciales o departamentales, hasta la dictadura. Al final y tras el torbellino político y el galimatías de administración pública posemancipación —que ha durado casi ciento sesenta años, en algunos casos—, cada ciudad ha sabido mostrar el aparente éxito urbano como forma de vida anhelada y expresión del orden constitucional.
- Bogotá, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago han sido las protagonistas de la identi-

dad nacional y en el aporte al crecimiento económico de sus respectivos países. Sin embargo, ahora compiten con otras economías regionales bajo una política de descentralización, concentrando aún los poderes ejecutivo, judicial y legislativo y prestando algunos servicios de salud, financieros y educativos con una mejor calidad, oportunidad y cobertura. Así las cosas, con grandes esfuerzos y aparente eficiencia en el gasto público, estas ciudades mantienen su liderazgo para asumir algunos retos nacionales asociados con los procesos globales de integración bilateral, multilateral y regional; de igual manera, los relacionados con el mejoramiento de la calidad de vida de la población, el cumplimiento de los ODS, la reducción de las emisiones GEI y la adaptación al cambio y la variabilidad climáticos.

- El análisis singular y comparativo del metabolismo urbano para las distintas ciudades logró sortear no solo la enorme dificultad de la asimetría de información que ya existe, sino el riesgo de comparar asentamientos humanos que no tienen una línea base unificada; de tal forma que los perfiles metabólicos se pudieron identificar, calcular y comparar de manera agregada en el horizonte de tiempo definido entre el año 2000 hasta la fecha. De esta manera, el capítulo 2 logra exponer los principales consumos y formas de desecho para Bogotá, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Ciudad de México, Lima y Santiago, con lo cual se cumple con el tercer objetivo específico.
- Bogotá crece con exigüos criterios de sustentabilidad ambiental, reflejados en un plan expansivo en horizontal, depredador de zonas de conservación, reservas forestales y el páramo de Sumapaz y una desarticulada gestión del territorio. También oculta una desaceleración cuyos primeros síntomas se aprecian en las marcadas fuerzas centrífugas que han promovido la desindustrialización y la reubicación de zonas francas en municipios del conurbano; así mismo, en la caída en la construcción y la reducción en la participación en el PIB nacional. A estos hechos se suman la inexistente política poblacional, de diseño urbano e ingeniería municipal, la contaminación creciente, la inseguridad y la desigualdad.

- La Ciudad Autónoma de Buenos Aires experimenta una homogenización del paisaje urbano y un favorecimiento de negocios inmobiliarios con la construcción masiva en altura y la urbanización sobre terrenos inundables, lo que exacerba el riesgo de desastre en épocas de lluvia y en las sudestadas. Además presenta problemas ambientales como la contaminación de los principales cuerpos de agua (Río de la Plata, Matanza y Riachuelo), la saturación de los vertederos de basura —vía Polvorines— que modifican el paisaje, la pérdida de calidad del aire y la presencia en el ambiente de sustancias peligrosas para la salud, entre otros males. Finalmente, se puede decir que su configuración urbana traslada su jurisdicción autónoma, obtenida en la Constitución de 1994, a la Aglomeración Gran Buenos Aires (AGBA), donde la pobreza, los problemas urbanos ambientales y los conflictos correspondientes se expresan en mayor medida.
- Lima y su área metropolitana (constituida por la Gran Lima: Norte, Este, Sur, Centro y el Callao) han experimentado un crecimiento urbano simbiótico que oscila entre la modernidad y la informalidad, que puede definirse como explosivo, disperso y espontáneo, en virtud del crecimiento vegetativo y migratorio de su población. En la actualidad, la ciudad, que se comporta como una sola estructura interdependiente con la colindante municipalidad provincial de el Callao, trata de asumir los retos de la integración regional en circunstancias de alta volatilidad económica, desigualdad creciente, pobreza, gran cantidad de asentamientos informales y las amenazas del cambio climático.
- Ciudad de México se mantiene como un proyecto neoliberal en el que el capitalismo —soportado en una gran capacidad de pago de impuestos— se reproduce de manera incesante, sobre todo por el fomento a las inversiones inmobiliarias privadas, a la concesión de ejes viales, a la transferencia de funciones del Gobierno al sector privado y al control que este ejerce sobre buena parte de los espacios públicos. Esta ciudad capital, con una enorme desigualdad social, sufre un grave deterioro

ambiental tanto en el aire como en el agua, el suelo y la biota y naturalmente, problemas de tráfico.

Además, por la inercia adquirida durante tres siglos de imposición de la lógica urbana europea, Ciudad de México —antiguo Tenochtitlán— sigue gestionando el agua de una manera ajena a la historia y realidad hídrica, hidrológica e hidrogeológica del valle de México: se inunda en cualquier situación de precipitación a causa de la escasa regulación natural de la escorrentía y la mínima infiltración en los mantos acuíferos. Así mismo, sufre por el abastecimiento y lleva al límite el sistema Cutzamala y a la vez afloran diariamente conflictos por el acceso y uso en un momento de creciente contaminación.

- Del conjunto de ciudades capitales estudiadas, Santiago es la que más refleja en su totalidad el modelo neoliberal y privatizador de la economía, que espacialmente ha marcado un proceso de estratificación social en la ciudad, definido por un centro que concentra al máximo el capital, en contraste con los barrios de la periferia, que se deterioran al asumir funciones de soporte y servicio. Esta relación urbano-regional entre la Comuna de Santiago, la Conurbación, el Área Metropolitana y la Región Metropolitana es bien definida por la municipalidad: se vive en la periferia, pero la actividad financiera se realiza en el centro. Finalmente, en virtud del modelo económico reinante, gran parte de la población es presa de un sistema de ahorro forzoso en fondos de pensiones privados, un *apartheid educativo* y servicios públicos y sanitarios concesionados muy onerosos, principalmente el agua.
- El metabolismo urbano de las ciudades capitales latinoamericanas, durante el periodo 2000 a 2015, demuestra que los consumos de agua, energía, alimentos y combustibles han aumentado en proporción al crecimiento demográfico y al PIB; de igual forma, los flujos de salida analizados (emisiones GEI, vertimientos, pérdidas y basuras). Se prevé que este comportamiento se mantendrá para el año 2025. Se presenta como caso anómalo Ciudad de México, que ha reducido su

PIB mientras crece el consumo agregado y la generación de basuras y emisiones.

- El crecimiento poblacional en las ciudades capitales objeto de estudio está influido principalmente por migración más que por crecimiento vegetativo. Casos representativos de este comportamiento son Lima y Bogotá, las cuales han sido las principales receptoras de población desplazada por la violencia y falta de oportunidades en sus respectivos países. Por su parte, Santiago y Buenos Aires Ciudad han tenido un crecimiento moderado de su población, comportamiento que se prevé mantener en el corto y el medio plazo; mientras que Ciudad de México experimenta un estancamiento, motivado, entre otras causas, por los precios de la tierra e inmuebles, la pérdida de calidad de vida por la contaminación creciente y el tráfico urbano.
- Para las cinco ciudades capitales el caso del crecimiento de población en todo el conurbano es preocupante, más aún si se consideran los anhelos de los Gobiernos municipales, de provincia y departamentales por consolidar estructuras administrativas tipo ciudad-región en una lógica de economías de aglomeración. Por tal motivo, es importante advertir que los procesos de metropolización de estos centros urbanos son totalmente desproporcionados al considerar la capacidad de administración municipal, los recursos disponibles, la capacidad de amortiguamiento de los sistemas naturales en su interior y alrededores y la disponibilidad de agua.
- En cuanto al valor monetario de la producción anual de bienes y servicios, se puede mencionar que estas ciudades capitales han tenido un buen comportamiento crematístico durante los siglos XX e inicios del siglo XXI, que les permitió convertirse en las mayores economías regionales en sus respectivos países. Participación nacional soportada por nodos de conexión y red de carreteras, vías férreas, aeropuertos internacionales, puertos (cuando aplica) y conectividad web de alta velocidad. Así mismo, por la concentración de los poderes ejecutivo, legislativo y judicial y el predominio de actores económicos de mayor rédito y generación de renta.

- Con respecto al PIB, se aprecia un marcado crecimiento en Bogotá, Lima Santiago de Chile y Buenos Aires, ciudad que entre los años 2005 y 2015 casi que cuadruplicó el valor monetario de todos los bienes y servicios producidos. Como excepción al comportamiento en América Latina, Ciudad de México presentó hasta el año 2015 un decrecimiento en su PIB, principalmente por el efecto perverso del modelo neoliberal y la crisis económica que en su momento afectó a la región. Aun así, para el año 2025 se espera que las cinco ciudades se mantengan como grandes economías regionales, lo que causará una enorme disipación de materiales y formas de energía no útil en su interior y alrededores. Es una expectativa de crecimiento económico que a duras penas les permitirá mantenerse en la misma posición relativa con respecto al país y la región a costa de exigir a su población vivir a una vertiginosa velocidad.
- En cuanto al vital líquido se refiere, las ciudades capitales realizan ingentes esfuerzos en cinco grandes frentes de trabajo: 1) preservar las actuales áreas naturales de abasto; 2) habilitar nuevas fuentes bajo un esquema de suministro distribuido entre la ciudad y el conurbano; 3) mantener la cobertura ante el crecimiento formal e informal de la ciudad; 4) reducir las pérdidas técnicas por conducción en tubería y las acometidas clandestinas y 5) mantener una continua campaña de sensibilización y educación ambiental para evitar el desperdicio en los sectores usuarios. Estas acciones —aunadas a la acción tarifaria— han permitido que el consumo no haya crecido de manera significativa en Bogotá, Lima, Buenos Aires Ciudad y Santiago. Un comportamiento distinto presenta Ciudad de México, cuyo consumo ha tenido un crecimiento desde el año 2005 hasta la fecha que la convierte en una de las ciudades capitales del mundo con un alto consumo per cápita que oscila entre 203 y 530 l/hab.día, dependiendo de la delegación.
- Las mayores preocupaciones en el suministro del agua para las ciudades capitales son: 1) reducir las pérdidas técnicas y por hurto, que actualmente alcanzan valores del 30 % al 40 % en los sistemas de conducción, lo que representa volúmenes

de entre 5 y 17 m³/s; 2) la conservación de las actuales fuentes de abastecimiento y la habilitación de otras para atender gradualmente la demanda, en momentos en que se presentan drásticas variaciones en los regímenes de lluvia y se reducen los glaciales en alta montaña y 3) la urgente atención de los crecientes conflictos ambientales y sociales por acceso y uso, principalmente entre las poblaciones que habitan las zonas de abasto y provisión y las que son receptoras de las aguas contaminadas.

- A la luz de los resultados, se puede mencionar que Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Lima, Ciudad de México y Santiago son sistemas complejos “devoradores” de energía eléctrica y de combustibles fósiles, comportamiento atribuido principalmente a la adicción tecnológica de sus habitantes, al dinamismo de sus economías, al modelo de consumo desmedido impulsado por la lógica del mercado neoliberal y global, a la expansión urbana, al tamaño creciente de su parque automotor y al incremental número de viajes y desplazamientos de sus habitantes.
- En cuanto al consumo de energía eléctrica, en tan solo quince años ciudades como Lima y Bogotá lo han triplicado, mientras que Santiago lo ha duplicado, Buenos Aires Ciudad ha tenido un aumento del 50 % y Ciudad de México ha tratado de estabilizarlo. Para el año 2025 se prevé que el consumo de energía siga en aumento, siendo más evidente —por la tendencia actual— en Lima, Santiago y Bogotá.
- En la mayoría de las ciudades analizadas el consumo de gasolina presenta un crecimiento sostenido durante el periodo de estudio, a saber: Buenos Aires Ciudad y Lima duplicaron el consumo, Santiago de Chile lo aumentó en un 18 %, mientras que Ciudad de México presentó un incremento del 75 %; por su parte, Bogotá mantuvo un comportamiento estable entre los años 2000 a 2015. Para el año 2025 se espera un incremento en el consumo de *fuel oil* n.º 2 y gasolina en todas las ciudades capitales, en virtud del aumento del parque automotor privado, de trabajo pesado para transporte de mercancías y de pasajeros.

- La presión de una población en aumento, el imaginario de prosperidad por medio del consumo incremental y la dieta del habitante promedio urbano son condiciones que han definido que el flujo agregado de alimentos haya aumentado de forma considerable en los últimos quince años en Lima, Bogotá, Santiago y Ciudad de México. Como excepción al incremento, Buenos Aires Ciudad presentó, durante el periodo 2005 a 2015 una reducción en el consumo del 24 %, atribuido sobre todo a la concienciación ciudadana de los riesgos asociados a la ingesta de carne roja. Este aumento en el consumo de alimentos, en la mayoría de las ciudades capitales, presenta un desafío para el sistema de abasto global, no solo por la exigencia de aumentar la producción inocua, eficiente y de bajo impacto ambiental, sino por la urgente necesidad de cambiar las dietas elevadas en calorías y de compartir los alimentos con los más necesitados.
- Como complemento dietario, las bebidas azucaradas, el agua embotellada y los licores han ganado terreno en la ingesta anual de los habitantes urbanos. A partir de las cifras, puede decirse que en todas las ciudades su consumo es incremental durante el periodo del estudio (2000-2015), razón por la cual en la proyección se estima que su participación en la dieta capitalina para el año 2025 será mayor, sustituyendo al agua potable como elemento hidratante.
- En lo que hace a los residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o vertederos, se puede decir que Ciudad de México, Santiago y Lima han duplicado la cantidad de basura generada en tan solo 15 años, mientras que en Bogotá el valor aumentó un 58 %. Por su parte, Buenos Aires Ciudad muestra una estabilización de las toneladas/día generadas, con un leve crecimiento en el año 2015. Para el futuro inmediato (2025) se proyecta un crecimiento en la cantidad de basuras producidas, con una marcada tendencia en Santiago, Lima y Ciudad de México.
- Durante los años 2000 a 2015 las ciudades capitales de América Latina no coadyuvieron en la reducción de CO₂ equivalente, acordada en el Protocolo de Kyoto, a saber: Ciudad de México y Lima presentaron un incremento del 61 %, Santiago un 27 % y Buenos Aires Ciudad un 8 %. Sin embargo, los ajus-

tes en los factores de emisión y el perfeccionamiento de los inventarios muestran asimetrías en los resultados, como es el caso de Bogotá. En el futuro, se espera que las emisiones GEI se mantengan con tendencia al alza, porque dependen principalmente del número de habitantes, del consumo de energía y combustibles, del número de desplazamientos, de la generación y disposición de basuras y los cambios en el uso del suelo, para los cuales todas las ciudades capitales del estudio se encuentran en un claro incremento.

- El esfuerzo que las capitales de Latinoamérica realizan para mantener su predominio nacional y en la región se concibe como un trabajo mecánico (W) que se alimenta con flujos M/E/I mediante un perfil metabólico urbano y que por la ineficiencia en los procesos de transformación y el consumo genera desorden, el cual es disipado en su interior y alrededores. Esta imposibilidad de las ciudades —y demás artificios humanos— de convertirlo en información útil justifica una aproximación termodinámica, pues su devenir y supervivencia dependerán de una adecuada gestión de la entropía.
- Como propiedad extensiva y bajo el amparo de las definiciones y disertaciones de Abbott y Van Ness (1975), Ben-Naim (2011), Carpintero (2006), Cengel y Boles (1994, 2012), Georgescu-Roegen (1971, 1979 y 1983), Keena y Shapiro (1947), Russell y Adebisi (1993) y Smith, Van Ness y Abbott (1997), se propone que la entropía total de una ciudad sea igual a la suma de todas las entropías parciales asociadas con los subsistemas másicos en su interior y sus alrededores. Esta decisión permite considerar al sistema urbano y su región como dos grandes subsistemas inmersos en uno aún mayor, hipotéticamente aislado, en el que el cambio de esta propiedad se puede obtener de la mencionada sumatoria, cuyo valor correspondería a la entropía generada:

$$\Delta S_{\text{Total}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}}$$

- De esta ecuación, el valor de la entropía interna ($\Delta S_{\text{interna}}$) se obtiene a partir de su estructura metabólica, expresada por

el flujo de materiales que ingresan al sistema urbano y por el consumo de energía eléctrica; así mismo, de la cantidad de personas que la habitan y frecuentan, del tamaño del área urbana construida, del número de vehículos que la recorren y de la temperatura ambiente promedio. Estos elementos coadyuvan a que el valor de la entropía aumente, mientras que los cuerpos de agua, las áreas verdes (parques, prados, jardines), las zonas de reserva forestal y de conservación urbana permitirán una disipación que reducirá el valor de ΔS .

- Dentro del sistema urbano también se presentan cambios de entropía ($\Delta S_{\text{interna}}$) como consecuencia de la generación y liberación de emisiones, vertimientos, residuos sólidos y ruido; así mismo, por los sistemas de tratamiento de gran magnitud, como los rellenos sanitarios, vertederos, torres de depuración de aire y plantas de tratamiento de aguas residuales. Por su parte, el conurbano y su población, los parques naturales y zonas de conservación y la frontera agrícola de la región determinan principalmente el aporte de la entropía desde los alrededores ($\Delta S_{\text{alrededores}}$).
- La ecuación Sigma S, como funcional matemático para calcular el cambio de entropía en una ciudad ($\Delta S_{\text{generada en la ciudad}}$), se fundamenta en una concepción urbana como máquina térmica compleja, cuyos procesos irreversibles pueden calcularse a partir de la termodinámica no atomista, al considerar trayectorias cuantitativamente similares a los procesos reversibles en los que el valor ΔS será el mismo, cualquiera que sea el método utilizado. Este axioma termodinámico lo enunciaron Abbott y Van Ness (1975), Ben-Naim (2011), Cengel y Boles (1994, 2012) y Smith, Van Ness y Abbott (1997).
- Un elemento interesante de esta ecuación es el *factor de aporte de entropía* ς , que permite una coherencia dimensional entre los 18 elementos de la ecuación Sigma S, de tal forma que pueda realizar la operación matemática de adición. Este factor de aporte está expresado con sendas unidades en función del elemento actividad aportante de entropía y permite que el valor del cambio ΔS_{Total} quede reportado en unidades de energía sobre temperatura absoluta: kJ/K .

- Como estrategia de gestión de la entropía generada se plantean cinco grandes acciones posibles, a saber: 1) deshacerse de esta sin control alguno; 2) disiparla internamente; 3) almacenarla en depósitos dentro del asentamiento humano o en su periferia; 4) disipándola en la periferia o 5) convirtiéndola en información útil para las organizaciones, comunidades e individuos. Con todo, por el principio de incremento, el valor de esta se mantendrá *in crescendo* hasta que se presente un drástico cambio de estado, por la superación de la homeostasis del sistema complejo. Este hecho llevará a la ciudad a un nuevo estado termodinámico de no equilibrio y de baja entropía en el que se repetirá el ciclo del colapso total o parcial.
- El cálculo y análisis del metabolismo urbano desde la perspectiva de la economía ecológica, la representación matemática de la homeostasis y la retroalimentación negativa a partir de la física de los sistemas amortiguados y la invención del funcional matemático Sigma S para determinar el cambio de entropía que genera una ciudad y su conurbano (ΔS) a partir de la termodinámica no atomista demuestran que las ciencias de la complejidad son útiles para identificar y solucionar los problemas ambientales urbanos en Latinoamérica.
- Se concluye que el objetivo general de la investigación se alcanzó, pues se obtuvo el perfil metabólico de las cinco principales ciudades capitales de habla hispana de América Latina y se construyó un funcional matemático para determinar el cambio de entropía en una ciudad, a partir del reconocimiento y uso de los principios de conservación de la materia y la energía, como fundamentos del metabolismo urbano y la termodinámica. Así mismo, se logró el planteamiento adicional de otra expresión matemática para exponer la forma como las ciudades mantienen estados pseudoestables en condiciones muy alejadas del equilibrio, tomando en cuenta el comportamiento de los sistemas amortiguados.
- Por último, este trabajo marca nuevos campos para ahondar en la investigación de la termodinámica y el metabolismo urbanos, principalmente en: 1) la validación del funcional matemático de homeostasis, obtenido en función del isomorfismo

con los sistemas amortiguados; 2) el continuo perfeccionamiento en el cálculo del metabolismo urbano en las ciudades y demás asentamientos humanos en Latinoamérica; 3) la validación del funcional Sigma S y obtención de las constantes de los factores de aporte de entropía; 4) el desarrollo de análisis de flujo de materiales y energía para metabolismos urbanos circulares y 5) el desarrollo matemático para validar la propuesta de las áreas depósito de entropía.

Referencias

- Abbott, M. M. y Van Ness, H. C. (1975). *Termodinámica, teoría y problemas*. Cali, Colombia: MacGraw-Hill.
- Abella, G. (2001). *Mitos, leyendas y tradiciones de la Banda Oriental*. Montevideo, Uruguay: Betum San Ediciones.
- Acebillo, J. (2012a). Post-Fordist urban paradigms. En J. Acebillo. *A new urban metabolism* (pp. 11-56). Barcelona, España: ICUP. Academi di Architettura, USI, Università della Svizzera Italiana.
- Acebillo, J. et al. (2012b). *A new urban metabolism*. Barcelona, España: ICUP. Academi di Architettura, USI, Università della Svizzera Italiana.
- Acevedo, J., Bocarejo, J. P, Lleras, G. C, Ospina G., Rodríguez A. y Echeverry, J. (Eds.). (2009). *El transporte como soporte del desarrollo de Colombia. Una visión al 2040*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Adams, R. N. (2007). *La red de la expansión humana*. México D. F., México: Centro de Estudios Superiores en Antropología Social, Universidad Autónoma Metropolitana y Universidad Iberoamericana.
- Agencia de las Naciones Unidas para los Refugiados (Acnur) (2018, 5 de diciembre). *Noticias Acnur, Alto Comisionado llama a una respuesta regional para la crisis de refugiados y migrantes venezolanos*. Recuperado de: www.acnur.org/noticias
- Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad de Buenos Aires (APRA) (2018). *Control ambiental*. Recuperado de: www.buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/controlambiental
- Ager, S. y Lawrence, W. (2015). Recuperar Detroit. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 37(5), 24-52.
- Aguirre, R. (2014). El plan agua para el Futuro de CDMX. *H₂O, gestión del agua*, 2, 12-21.
- Agulles, J. (2017). *La destrucción de la ciudad, el mundo urbano en la culminación de los tiempos modernos*. Madrid, España: Catarata.
- Alape, A. (1983). *El Bogotazo: memorias del olvido*. Bogotá, Colombia: Pluma.
- Alba J. (2003). *Crisis de crecimiento o ausencia de infraestructura*. *Bitácora*, 1(7), 6-12.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2014, 5 de noviembre). *Altos de la Estancia: el mayor deslizamiento urbano en América Latina*. Recuperado de: www.bogota.gov.co
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2016). *Hacia una política pública de seguridad alimentaria y nutricional para Bogotá*. Bogotá, Colombia. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Aldana, M. (2006). *Redes complejas*. En M. Aldana (2006). México D. F., México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <https://www.fis.unam.mx/~max/English/notasredes.pdf>
- Alfaro, F. y Ochoa, A. (2013). Equipamiento urbano en México de la segunda mitad del siglo XX. *Arquitectura Urbana*, 9, 119-132.

- Alfonso, W. & Pardo, C. (2014). Urban material flow analysis: an approach for Bogotá, Colombia. *Ecological Indicators*, 5(10), 43-62.
- Alhadeff-Jones M. (2009). Revisiting educational research through Morin's paradigm of complexity; a response to Ton Jörg's programmatic view. *Complexity*, 6(1), 61-70.
- Alianza por la Salud Alimentaria (ASA) (2016, junio). Destapando la verdad: el impuesto a las bebidas azucaradas en México funciona. *Hoja Informativa 2016*. Ciudad de México, México: ASA.
- Álvarez V. (8 de octubre de 2017). Space, 4 años en ruinas. *El Colombiano*, 5.
- Anderson, P. (1999). The eightfold way to the theory of complexity: a prologue. En Cowan *et al.*, *Complexity: metaphors, models and reality*. Boulder, EE. UU.: Perseus Books.
- Ángela, A. y Velásquez, L. (2008). Estudios ambientales urbanos. *Gestión y Ambiente*, 11(1), 7-20.
- Aranda, G. (2013, 27 de julio). La tragedia que llegó cuando España quería conquistar el mundo. *El Mundo*, 12.
- Arnold, V. (1981). *Singularity Theory. Selected Papers*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Arocena, R. (2014). La investigación universitaria en la democratización del conocimiento. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 9(27), 85-102.
- Arteaga, J. (2015). 6 problemas ambientales y sociales que colapsarán al DF. *Revista Forbes México*. Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/>
- Avellaneda, J. (1988). *Calles de Santafé de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Academia de Historia de Bogotá-Tercer Mundo Editores.
- Ávila, A. (2010). *Satisfacción de las necesidades alimentaria en el D. F.* México, D. F., México. Consejo de Evaluación de Desarrollo Social del Distrito Federal.
- Ávila, P. Z. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, 28, 409-423.
- Axelrod, R. (2004). *La complejidad de la cooperación, modelos de cooperación y la colaboración basada en agentes*. Buenos Aires, Argentina: Fondo de Cultura Económica.
- Axelrod, R., & Cohen, M. (1999). *Harnessing complexity: organizational implications of a scientific frontier*. Nerw York, EE. UU.: The Free Press.
- Ayeni, M. (1976). The city system and the use of entropy and urban analysis. *Urban Ecology*, 2(1), 33-53.
- Bailey, K. (1990). Social entropy theory: An overview. *System Practices*, 3, 365-382.
- Banco de Alimentos de Bogotá. (2018). *Cifras de enero a diciembre de 2018*. Recuperado de: www.bancodealimentos.org.co

- Banco Central de Chile. (2016). *Cuentas nacionales de Chile: PIB regional 2016*. Santiago, Chile: Banco Central de Chile.
- Banco Central de Chile (2016). Producto interno por región. En *Cuentas Nacionales de Chile 2013-2016*. Santiago, Chile: Banco Central de Chile.
- Banco Central de la Reserva del Perú. (2018). *Cuadros de análisis histórico: tipo de cambio desde 1950*. Formulario web disponible en: www.bcrp.gob.pe
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2015). *Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles*. [en línea]. Recuperado de: <http://www.iadb.org/en/topics/emerging-and-sustainable-cities>
- Banco Mundial. (2012). *Gestión integral de aguas urbanas. Estudio de caso: Buenos Aires*. Washington D. C., EE. UU.: Banco Mundial.
- Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (Banobras). (2018). *Ficha de proyecto 0796, Planta Termo Valorización en la CDMX*. Recuperado de: <http://www.proyectosmexico.gob.mx>
- Barabási, A. (2008). *Linked. How everything is connected to everything else, and what it means for business, science and everyday life*. New York, EE. UU.: A Plume Book.
- Barnsley, M. (2007). *Environmental Modeling: A Practical Introduction*. Boca Raton, EE. UU.: CRC Press.
- Battaner, E. (2005). *Un físico en la calle, fluidos, entropía y antropía*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Batty, M (1974). Spatial entropy. *Geographic. Anal.* 6, 1-31.
- Bauman, Z. (1991). *Modernity and Ambivalence*. Cambridge, EE. UU.: Polity Press.
- Bauman, Z. (2013). *Liquid Modernity*. Cambridge, EE. UU.: Polity Press.
- Bayón, M. C. (2016). La ciudad de las márgenes: periferias lejanas, desventajas y fragmentación. En L. Álvarez, G. C. Delgado, A. Leal, (Eds.). *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI*, (pp. 457-476). Ciudad de México, México. Senado de la República, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Programa Universitario de Estudios sobre Ciudad y Programa Universitario de Estrategias para la Sostenibilidad.
- Benavides, J. (2012). *La aglomeración, ventaja paradójica para Bogotá*. *Contacto*, 5, 62-66.
- Bengoa, J. (1996). *Historia del pueblo Mapuche, siglos XIX y XX* (5.ª ed.). Santiago, Chile: Ediciones Sur.
- Ben-Naim, A. (2011). *La entropía desvelada, el mito de la Segunda Ley de la Termodinámica y el sentido común*. Barcelona, España: Editorial Tusquets.
- Bergström, L. (2012). *Escalation: Explorative studies of high-risk situations from the theoretical perspectives of complexity and joint cognitive systems*. Odense, Denmark: Lund University Centre for Risk Assessment and Management (Lucram).

- Bermúdez, A. (1995). *Del Bogotazo al Frente Nacional: historia de la década que cambió a Colombia*. Bogotá, Colombia: Tercer Mundo Editores.
- Bertalanffy, L. (1994). *Teoría general de los sistemas*. Bogotá, Colombia: Fondo de Cultura Económica.
- Bertalanffy, V. (2006). *Teoría general de los sistemas, fundamentos, desarrollo y aplicaciones* (Trad. Juan Almela). México D. F., México. Fondo de Cultura Económica.
- Bertaud, A. (2016). Desarrollo urbano y productividad. *Urbana*, 69, 32-37.
- Bettini, V. (1998). *La ciudad como sistema disipador*. En V. Bettini. *Elementos de ecología urbana* (pp. 109-131). Valladolid, España. Trotta.
- Biblioteca Nacional Digital (BND). (2018). La transformación económica chilena entre 1973 y 2003. En *Memoria Chilena*. Biblioteca Nacional de Chile. Recuperado de: www.memoriachilena.cl
- Birkeland, J. (2008). Sustainable urban form: from spatial minimization to spatial amplification. En J. Birkeland. *Positive Development, from vicious circles to virtuous cycles* (pp. 43-61). London, United Kingdom: Earthscan.
- Birocco, C. (2009). Los indígenas de Buenos Aires a comienzos del siglo XVIII: los reales pueblos de indios y la declinación de la encomienda. *Revista de Indias LXLX*, 247, 83-104.
- Blasco, J. (2015). *México antes de México, la urbanización prehispánica del altiplano, Tenochtitlán y Teotihuacán*. Recuperado de: <http://urban-networks.blogspot.com/2015/03/mexico-antes-de-mexico-la-urbanizacion.html>
- Bogotá invadida. (2017). *Semana*, 18, 34-36.
- Boff, L. (1996). *Ecología, grito de la tierra, grito de los pobres*. Madrid, España: Trotta.
- Bonnefoy, P. (2016, 7 de marzo). Un exsoldado chileno recuerda con culpa las atrocidades de la dictadura de Pinochet. *The New York Times*, 24).
- Bouvier, A. y George, M. (2005). *Diccionario Akal de Matemáticas* (Trad. V. Bordoy y M. Armiño). Tres Cantos, España: Akal.
- Boyer, R. (1973). *Mexico city and the great flood, aspects of life and society 1629-1635*. Connecticut, EE. UU.: University of Connecticut.
- Brailovsky A. E. (2010). *Buenos Aires, ciudad inundable. ¿Por qué está condenada a un desastre permanente?* Buenos Aires, Argentina. Ediciones Kaicron-Capital Intelectual.
- Brailovsky, A. E. (2012). *Historia ecológica de la ciudad de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina. Ediciones Kaicron.
- Brescia V. y Rabaglio M. (2015). *Estructura del gasto en alimentos y bebidas. Buenos Aires Ciudad Autónoma*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

- British Broadcasting Corporation (BBC) (2015, 6 de mayo). Piloto suicida de Germanwings ensayó el descenso para estrellar el avión. *BBC*. Recuperado de: www.bbc/mundo
- Brodbeck, S. (1988). La fundación de Santafé. En *Boletín de Historia y Antigüedades LXXV*. Bogotá, Colombia: Academia Colombia de Historia.
- Brown, M. & Ulgiati, S. (1997). Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 9, 51-69.
- Brown, T., Lemay, H. y Bursten, B. (1993). *Química: la ciencia central* (Trad. Hidalgo M.). México D. F., México. Prentice Hall Hispanoamericana.
- Brown, T., LeMay, E. & Bursten, B. (1991). *Chemistry: The central science*. New York. EE. UU.: Prentice Hall Inc.
- Brunner, P. (2007). Reshaping Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2) 11-13.
- Buenos Aires Ciudad Autónoma (2011). *Modelo territorial de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina: Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Buenos Aires Ciudad Autónoma (2015). *Inventario de gases efecto invernadero 2000-2014, versión extensa*. Buenos Aires, Argentina: Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Bunge, M. (2007). *A la caza de la realidad*. Barcelona, España: Gedisa.
- Burdett, R. & Sudjic, D. (2011). *Living in the endless city*. London. United Kingdom: Phaidon Press Inc., London Economics School.
- Caballero, C. (2013). Por la calidad de vida urbana. *Contacto, Ingeniería y Planificación*, 6, 4-5.
- Cabral, P., Augusto, G., Tewolde, M. & Araya, Y. (2013). Entropy in urban systems. *Entropy*, 15, 5223-5236.
- Cacciari, M. (2010). *La ciudad* (Trad. Moisés Puente). Barcelona, España: Gustavo Gili SL.
- Cámara Argentina de la Construcción. (2010). *Estudios geoestadísticos para la ciudad de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina: Cámara Argentina de la Construcción.
- Caputo, P. (2012). Cities, energy and metabolism: an overview. En J. Acebillo. *A new urban metabolism* (pp. 57-62). Barcelona, España: ICUP, Academi Di Architettura, USI, Università Della Svizzera Italiana.
- Cárdenas, U. (2017). *El metabolismo urbano como disciplina para determinar la sostenibilidad de las ciudades*. Lima. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Caride, H. (2007). *La conurbación de Buenos Aires como objeto de estudio histórico, argumentos científicos y lógicas disciplinares*. Buenos Aires, Argentina: Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas.
- Carnegie, D. (1979). *Cómo hablar bien en público* (Trad. Jore Ciancaglini). Bogotá, Colombia: Ediciones Cosmos.

- Carpintero, O. (2006). *La bioeconomía de Georgescu-Roegen. Serie Ensayos Montesinos*. Madrid, España: Ediciones de Intervención Cultural.
- Carrión, R. (2005). *El culto al agua en el antiguo Perú: la Pacha, elemento cultural panandino*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Cultura.
- Castells, M. (1999). *La era de la información, Volumen II*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Castiblanco, C. (2008). *Manual de valoración económica del medio ambiente. Serie Ideas n.º 13*. Bogotá D. C., Colombia: IDEA Universidad Nacional de Colombia.
- Cataño, E. (2012). Ciudades y cambio climático: una oportunidad para la lucha contra la pobreza y la exclusión. *Anales de Ingeniería*, 124(921), 32-35.
- Cengel, Y. & Boles, M. (1994). *Thermodynamics*. New York. EE. UU.: McGraw Hill.
- Cengel, Y. y Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México D. F., México: McGraw Hill.
- Centro de Despacho Económico de Carga (CDEEC-SIC). (2015). *Estudio de previsión de demanda 2015-2035 (2050)*. Santiago, Chile: Dirección de Planificación y Desarrollo SIC.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Económico Metropolitano (Cedem). (2014). *El consumo de energía en la ciudad de Buenos Aires en 2013. Informe de Resultados 663*. Buenos Aires, Argentina: Buenos Aires Ciudad.
- Chapa, J. C. (2012). *Matemáticas y astronomía en la América precolombina*. Indiana, EE. UU.: Palibrio.
- Chapa, J. C., Flores, D. y Zúñiga, L. (2015). *La industria de las bebidas no alcohólicas en México*. Nuevo León, México: Centro de Investigaciones Económicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Chiriví, E. (2016). El otro sendero: informalidad urbana y competitividad. *Urbana*, 69, 16-22.
- Chomsky, N. (2010, april 8th). *The radical intellectual*. Text of lecture delivered at the Haven Center. Madison, Wisconsin: 2010. Recuperado de: <http://chomsky.info/20100408>
- Cilliers, P., & Nicolescu, B. (2012). Complexity and transdisciplinary-discontinuity, levels of reality and the hidden third. *Futures*, 44(8), 711-718.
- City of Las Vegas (2015). *Wastewater treatment*. Recuperado de: <http://old.lasvegasnevada.gov/information/5397.htm>
- City of Vancouver (2018). *Green Vancouver*. Recuperado de: <https://vancouver.ca/>
- Ciudad de México (CDMX). (2016, 17 de octubre). Programa de Sustentabilidad y Gestión de los Servicios Hídricos (PSGSH). En *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*,. Ciudad de México, México: CDMX.
- Ciurana, E. (2007). *Introducción al pensamiento complejo de Edgar Morín*. Guadalajara, México: Editorial Universitaria, Universidad de Guadalajara.

- Clausius, R. (1867). *The Mechanical Theory of Heat: With its Applications to the Steam-Engine and to the Physical Properties of Bodies*. London, United Kingdom: Van Voorst.
- Clichevsky, N. (2002). *Pobreza y políticas públicas urbano-ambientales en Argentina*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo, n.º 49. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.
- Clichevsky, N. (2003). *Pobreza y acceso al suelo urbano. Algunas interrogantes sobre las políticas de regularización en América Latina*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo n.º 75. Santiago de Chile, Chile. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.
- Clichevsky, N. (2006). *Previniendo la informalidad urbana en América Latina y el Caribe*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo n.º 124. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.
- Cobo, B. (1882). *Historia de la fundación de Lima* (t I). Imprenta Liberal. Manuscrito disponible en: <http://archive.org>
- Comisión Multisectorial de Seguridad Alimentaria y Nutricional. (2013). *Estrategia Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional 2013-2021*. Lima, Perú: Oficina de Planeamiento y Presupuesto del Ministerio de Agricultura y Riego.
- Comisión Nacional de Energía. (2018). *Energía abierta Beta*. Aplicativo web disponible en: www.datos.energiaabierta.cl/
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2013). *Estadísticas del Agua en México, edición 2013*. Ciudad de México, México: Conagua.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2017). *Estadísticas del Agua en México, edición 2017*. Ciudad de México, México: Conagua.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2010). *Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile.
- Computherm. (2018). *Pandat*. www.computherm.com
- Cook, S. (1971). *The flow of energy in an industrial society*. *Scientific American*, 224(3), 135-144.
- Cook, S. (1973). Production, ecology y economic anthropology: notes towards and integrated frame of reference. *Social Science Information*, 12(1), 25-52. <https://doi.org/10.1177/053901847301200102>.
- Cortés, S. (2009). La capacidad de carga como herramienta para la ordenación sostenible del territorio. *Hábitat*, 42, 35-56.
- Coulter D. (2009). La caída de los mayas, ellos mismos lo ocasionaron. En *Ciencia Beta* [en línea]. Recuperado de: <https://ciencia.nasa.gov>

- 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, Argentina: Centro de Investigaciones Ambientales-Espacio Editorial.
- Daly, H. (2001). *Beyond growth: avoiding uneconomic growth*. En M. Munashinge et. al., *Sustainability of long term growth: Socioeconomic, an ecological perspectives* (pp. 45-63). United Kingdom: Edward Elgar Publishing Limited.
- Daniels, P. (2002). Approaches for quantifying the metabolisms of physical economies: A comparative studio. *Journal of Industrial Ecology*, 6(1), 65-88.
- Dávila, J. (2013). Cómo planificar una ciudad ya construida. *Contacto, Ingeniería y Planificación*, 6, 5-12.
- De la Peña, M., Ducci, J. y Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Nota Técnica IDB-TN-521. Washington, EE. UU.: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- De Mattos C. (2010). Financiarización, lógica mercantil y reconfiguración urbana: ¿hacia una ciudad mercancía? En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal, *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI* (pp. 105-136). Ciudad de México, México: Senado de la República-Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Programa Universitario de Estudios sobre Ciudad-Programa Universitario de Estrategias para la Sostenibilidad.
- De Mosquera, T. (1855, 1982). *Resumen histórico de los acontecimientos que han tenido lugar en la República*. Imprenta del Neo Granadino-Incunables. Bogotá, Colombia: Incunables.
- De Ramón, A. (1992). *Santiago de Chile (1541-1991), historia de una sociedad urbana*. Madrid, España: Editorial Mapfre.
- Defense Advanced Research Projects Agency (Darpa). (2018). *Darpa Open Catalog, Anomaly Detection at Multiple Scales-ADAMS*. Recuperado de: <http://www.darpa.mil/work-with-us/darpa-open-catalog>.
- Del Castillo, J. (2016, agosto). Lima la fértil: de la inconsistencia del discurso de la ciudad-desierto. *Arch Daily Perú*. Lima, Perú: Archdaily Perú.
- Delacámara, G. (2012). *Análisis económico de externalidades ambientales, guía para decisores. Documentos de proyectos n.º 200*. Santiago de Chile, Chile: German Agency for Technical Cooperation-UN. Cepal.
- Delgado, G. C. (2012). Metabolismo urbano y transporte. En G. C. Delgado. *Transporte, ciudad y cambio climático* (pp. 23-41). México D. F., México: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades UNAM.
- Delgado, G. C. (2015). Ciudad y buen vivir: ecología política urbana y alternativas para el bien común. *Theomai*, 32, 36-56.
- Delgado, G. C. (2015). Ciudad, ecología, clima y bien común: Estado de situación, retos y perspectivas desde América Latina. *Entorno*, 28(2), 82-92.

- Delgado, G. C., Campos, C. y Rentería, P. (2012). Cambio climático y metabolismo urbano en las megaurbes latinoamericanas. *Habitat Sustentable*, 2(1), 2-25.
- Delgado, J. O. (2015). Lo urbano y la crítica de la economía política. En I. S. Castillo, J. O. Delgado y C. Hernández. *Zonas Metropolitanas. Reflexiones teóricas y estudios en el centro del país* (pp. 17-44). Tlaxcala, México: Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- De Sousa Santos, B. (2010). *Decolonizar el saber, reinventar el poder* (Trad. José Luis Exeni). Montevideo, Uruguay: Ediciones Trilco.
- Diamond, J. (2006). *Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen* (Trad. Ricardo García Pérez). Bogotá, D. C., Colombia: Random House Mondadori Ltda.
- Díaz, A. (2006). *Pobreza y precariedad urbana en México: un enfoque municipal serie medio ambiente y desarrollo*, n.º 130. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos UN-Cepal.
- Díaz, C. J. (2011). *Metabolismo de la ciudad de Bogotá D. C.: una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana* (tesis de maestría). Bogotá D. C., Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Díaz, C. J. (2012a). Bogotá, entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible. En F. Viviescas y C. J. Díaz, *Cuadernos de Utopía Colombia n.º 2. Seminario Permanente* (81-125). Bogotá, Colombia: Universidad Central.
- Díaz, C. J. (2012b). *La ciudad, entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible*. Degrowth in the Americas. Montreal, Canada: Concordia University.
- Díaz, C. J. (2014). Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina*, 2, 51-70.
- Díaz, C. J. (2013). Mapas mentales y estilos de aprendizaje; aportes a la enseñanza-aprendizaje en un espacio formativo en ingeniería. *Educción en Ingeniería*, 8(16), 45-52.
- Díaz, C. J. (2017). Del pensamiento lineal a la realidad compleja. ¿Por qué la gestión de la calidad del aire urbano falla? En M. I. Páez. *Congreso Colombiano y Conferencia Internacional Casap, Gestión de la calidad del aire, retos y alternativas para la salud urbana* (pp. 34). Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Díaz, C. J. (2018). Complejidad, gestión y disipación en la ciudad: aproximación desde la Entropía. *Questionar*, 6(1), 25-36.
- Díaz, C. J. (2023). Ciudades de baja entropía, propuestas de gestión de la masa, energía y sus consumos. En Pérez Ramírez, C. A. y Rogel Fajardo, I. (Coords.). *La encrucijada ambiental: enfoques y experiencias en el devenir de los territorios*. Ciudad de México: Comunicación Científica, Universidad Autónoma del Estado de México. <https://doi.org/10.52501/cc.120>

- Díaz, C. J. y Bustos M. (2017). *Contaminación por mercurio en Bogotá y su Conurbano*. Bogotá, Colombia: Universidad Central.
- Díaz, C. J. y León N. (2012). Bogotá D. C.: Indicadores de insostenibilidad ambiental. En *Memorias del Congreso Latinoamericano de Ecología Urbana*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Díaz, C. J. y Montero A. L. (2019). La complejidad. ¿Entre la dicotomía de pensamiento y método? *Universciencia*, 17(50), 69-86.
- Díaz, C. J. y Pulecio C. (2016). *Metabolismo y entropía en las ciudades: análisis y gestión para la sustentabilidad*. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal, *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI* (pp. 343-362). Ciudad de México, México: Senado de la República-Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Programa Universitario de Estudios sobre Ciudad y Programa Universitario de Estrategias para la Sostenibilidad.
- Díaz, C. J. y Pulecio C. (2016). Modelos, mapas mentales y estilos de aprendizaje: aproximación desde la neurociencia cognitiva. En Acofi, *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería Acofi 2016* (pp. 1519). Cartagena de Indias, Colombia: Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería-Acofi.
- Díaz, C. J. y Pulecio C. (2018). Gestión universitaria desde la complejidad de los sistemas colaborativos cognitivos. *Gestión Universitaria*, 11(2), 15-25.
- Díaz, C. J., Marín R. y Silva J. (2015). Metabolismo hídrico de Bogotá: el gran reto urbano de la gestión del agua. En R. Marín, C. J. Díaz y G. N. Gutiérrez, *La pobreza del agua, soluciones en momentos de crisis*. (pp. 107-134). Bogotá D. C., Colombia: Universidad Central.
- Drake, N. (2018). La canica azul. *Revista Oficial de National Geographic Society en Español*, 42(3), 22-65.
- Draper, R. (2018). Te vigilan. *Revista Oficial de National Geographic Society en Español*, 42(2), 24-80.
- Ducci, M. E. (1986). El terremoto de México y las tareas de reconstrucción ¿una lección para América Latina? *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano-Regionales*, 13(38), 35-45.
- Duhau, E. y Giglia, A. (2008). *Las reglas del desorden, habitar la metrópoli*. Ciudad de México, México: Siglo XXI Editores.
- Durán, G. (2015). Agua y pobreza en Santiago de Chile, morfología de la inequidad en la distribución del consumo domiciliario de agua potable. *EURE*, 41(124), 225-246.
- Durkheim, E. (1986). *Las reglas del método sociológico* (1.ª ed.). México D. F., Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Empresa Municipal de Mercados S. A. (2018). *Series históricas por volumen de los principales productos*. Formulario web disponible en: www.emmsol.com.pe/index.php/estadisticas

- Engel, W. (1997). *Richter*. Bogotá, Colombia: Villegas Editores.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2009). *Urban Heat Island Basics, Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. Environmental Protection Agency, U.S [en línea] Recuperado de: www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm
- Equilibrium. (2016). *Sedapal, Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. Informe de clasificación 22 de julio de 2016*. Lima, Perú: Equilibrium Clasificadora de Riesgo S. A.
- Escalante, P. (2016). El México antiguo. En P. Escalante *et al.*, *Nueva historia mínima de México* (pp. 11-51). Ciudad de México, México: El Colegio de México.
- ESI Group. (2018). *Thermodynamic simulation-SimulationX*. Aplicativo disponible en: www.simulationx.com
- Estudi Ramon Folch Associats S.L-ERF (2014). *Metabolismo urbano, cambio climático y sostenibilidad en el Plan Metropolitano de Lima Callao, Perú*. Recuperado de: www.erf/es/projects/
- Evans, M. (2019, august 11). What is environmental sustainability? *The Balance Small Business*, Paper n.º 3157876.
- Ewen, F. (2002). *Bertolt Brecht, su vida, su obra, su época*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Adriana Hidalgo.
- Ezcurra, E. (2001). *De las chinampas a la megalópolis, el medio ambiente en la cuenca de México*. La Ciencia para Todos, n.º 91. México D. F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Fariña, J. y Ruiz, J. (2002). Orden, desorden y entropía en la construcción de la ciudad. *Urban Universidad Politécnica de Madrid*, 7, 8-15.
- Ferguson, J. (1999). *Expectations of modernity: myths and meanings of urban life on the Zambian Copperbelt*. Berkeley, EE. UU.: University of California Press.
- Fernández, L. (2016). Urbanismo y ecología en Buenos Aires, un recorrido por la planificación urbana en su contexto ecológico-regional. *Brazilian Journal of Urban Management*, 1(8), 12-27.
- Fistola, R. (2011). The unsustainable city. Urban entropy and social capital; the needing of a new urban planning. *Procedia Engineering*, 21, 976-984.
- Flores, A. (2005). *El sistema municipal y superación de la pobreza y precariedad urbana en el Perú*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo, n.º 120. Santiago de Chile. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Naciones Unidas-Cepal.
- Foer, J. (2011). *Moonwalking with Einstein: The art and science of remembering everything*. New York, EE. UU.: The Penguin Press-Penguin Group.
- Foer, J. y Steber, M. (2007). No lo olvide. *Revista Oficial de National Geographic Society en Español*, 21(5), 27-58.

- Foley, J. (2014). Alimentar a 9000 millones. *Revista Oficial de National Geographic Society*, 34(5) 18-63.
- Fort Benning (2018). HHC/1-507 PIR. United States Army Pathfinder School. Recuperado de: <http://www.benning.army.mil/infantry/artb/1-507th/Pathfinder/index.html>
- Francisco Papa. (2015). *Carta Encíclica Laudato Si, sobre el cuidado de la casa común*. Bogotá, Colombia: San Pablo.
- Francisco Papa. (2016). *Exhortación apostólica Amoris Laetitia, sobre el amor en la familia*. Ciudad del Vaticano. Vaticano: Tipografía Vaticana.
- Francisco Papa. (2018). *Audiencia pública del año nuevo 2018 del Santo Padre ante el cuerpo diplomático*. Ciudad del Vaticano. Vaticano: Aciprensa.
- Freeman, A. (1993). *The measurement of environmental y resources value: theory and methods*. Washington D. C., EE. UU.: Resources for the Future.
- Freedman, R. (1961). *Marx on economics*. New York, EE. UU.: Harcourt, Brace & World Inc.
- Friedman, T. (2005). *The world is flat: a brief history of the twenty first century*. New York, EE. UU.: Farrar, Straus and Giroux.
- Fundación para la Implementación, Diseño, Evaluación y Análisis de Políticas Públicas AC-Fundación IDEA, Cámara de Senadores del H. Congreso de la Unión y SIMO Consulting. (2014). *México compacto, las condiciones para la densificación urbana inteligente en México*. Ciudad de México, México: Grupo Impresa.
- Funtowicz, S. y Ravetz, J. (2003). Post normal science. *Internet Encyclopaedia of Ecological Economics*. <http://isecoeco.org/pdf/pstnormsc.pdf> Ispra. International Society for Ecological Economics.
- Galeana, P. (2006). *Juárez en la historia de México*. México D. F., México: Cámara de Diputados LIX Legislatura-Editorial Miguel Ángel Porrúa.
- Gallardo, F. (2017). *Breve historia de la desecación de los lagos del valle de México: desde Tenochtitlán hasta el nuevo aeropuerto internacional*. Ciudad de México, México: Nexos-La Brújula.
- Gallo, R. (2005). *México D. F. lectura para paseantes*. México D. F., México: Turner Publicaciones SL.
- Galvis, L. (2013). *¿El triunfo de Bogotá?: desempeño reciente de la ciudad capital, Documentos de trabajo sobre economía regional*. Cartagena, Colombia: Banco de la República.
- Galway L., Parkes, M., Allen D. & Talaro, T. (2016). Building interdisciplinary research capacity: a key challenge for ecological approaches in public health. *AIMS Public Health*, 3(2), 319-406.
- Gamarra, M. (2010). *La última muralla de Lima: Santa Lucía*. Lima, Perú: La Biblioteca.
- Gandy M. (2005). Learning from Lagos. *New Left Review*, 33, 37-52.

- Garay, F. (1888). *El valle de México, apuntes históricos sobre su hidrografía, desde los tiempos remotos hasta nuestros días*. México, México: Oficina Topográfica de la Secretaría de Fomento.
- García, B. (2016). *La época colonial hasta 1760*. En P. E. Gonzalbo et al., *Nueva historia mínima de México* (pp. 58-112, 13.^a reimp.). Ciudad de México, México: El Colegio de México.
- García, H. (2009). Restricciones ontológicas en la Política de Calidad el Aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 30, 122-132.
- García, M. (2015). El control del crecimiento de la población y las mujeres en México: organismos internacionales, sociedad civil y políticas públicas. *Revista Colombiana de Sociología*, 38(2), 93-111.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona, España: Gedisa.
- Garciadiego, J. (2016). *La revolución*. En P. E. Gonzalbo et al., *Nueva Historia Mínima de México* (pp. 225-253, 13.^a reimp.). Ciudad de México, México: El Colegio de México.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Massachusetts, EE. UU.: Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen, N. (1979). Energy analysis and economic valuation. *Southern Economic Journal*, 44, 1023-1058.
- Georgescu-Roegen, N. (1983). La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular. *El Trimestre Económico*, 198, 829-860.
- Georgescu-Roegen, N. (1996). *La ley de la entropía y el proceso económico* (Trad. Luis Gutiérrez Andrés). Madrid, España: Fundación Argentina-Visor.
- Gilbert, N., Gutiérrez A., Frazer B. y Jones R. (1981). *Relaciones ecológicas* (Trad. Carlos García). Barcelona, España: Editorial Blume.
- Gilbert, N. y Troitzsen, K. (1999). *Simulation for the social scientist*. New York, EE. UU.: Open University Press.
- Girardet, H. (1992). *The Ghaia atlas of cities: New directions for sustainable urban living*. New York, EE. UU.: Anchor Books.
- Gobierno de la Ciudad de México (CDMX). (2018). *Historia de la Ciudad de México*. Recuperado de: www.cdmx.gob.mx/cdmx/sobre-nuestra-ciudad
- Gómez, C. (2002). *Crecimiento económico y desarrollo sostenible*. En J. C. Jiménez (Ed.), *Economía y territorio* (pp. 19-44). Madrid, España: Civitas.
- Gómez, J. y Obando, C. (2014). La motorización, el número de viajes y la distribución modal en Bogotá: el pasado y posible futuro. *Revista de Ingeniería*, 40, 6-13.
- Gómez, Y. (2016, 20 de noviembre). ¿Qué es lo que pasa con la Ven der Hammen? *El Tiempo*, 7-8.

- González, A. (1978). *Las tres plazas coloniales de Bogotá*. En C. Sanz de Santamaría, *Bogotá: estructura y principales servicios públicos* (pp. 126-184). Bogotá, Colombia: Cámara de Comercio de Bogotá.
- González, R. (1998). Impacto de la invasión hispana sobre los indígenas rio-platenses (1580-1640). *Quinto Sol*, 2, 111-140.
- Gooding, N. (1997). *Balance de materia*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gossaín, J. (2016, 29 de octubre). Soledad en Bogotá, crisis en Cali, progreso en Barranquilla y Medellín. *El Tiempo*, 20-21.
- Gotzsche, P. (2016). *Psicofármacos que matan y denegación organizada*. Madrid, España: Los Libros del Lince.
- Grez, S. (2006). Una mirada al movimiento popular desde dos asonadas callejeras 1888-1905. *Revista de Estudios Históricos*, 3(1), 157-163.
- Groot, J. (1957). *Historia eclesiástica y civil de la Nueva Granada* (t. I, cap. VII). Bogotá, Colombia: Ministerio de Educación Nacional.
- Guillermo Yepes y Klas Ringskog Consultores. (2002). *Estudio de oferta y demanda de servicios de agua potable y alcantarillado: Lima y Callao*. Lima, Perú: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima.
- Gugliotta, G., Zoumavliov, V., Garret K. y Norfolk S. (2007). Misterios mayas. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 21(2), 2-49.
- Günel, G. (2017). Demoing unto death: Smart cities, environment and pre-emptive hope. *The Fibreculture Journal (FJC)*, 215.
- Günter, J. y Lonhman, G. (1992). *Lima*. Madrid, España: Mapfre.
- Gurdian-Fernández, A. (2007). *El paradigma cualitativo en la investigación socio-educativa*. San José, Costa Rica: Coordinación Educativa y Cultural Centro Americana y Agencia Española de Cooperación Internacional.
- Guthrie, J. (1963). *Economía* (Trad. de la 1.^a ed. revisada, Manuel de J. Fernández). México D. F., México: Uteha.
- Haberl, H. (2001). The energetic metabolism of societies. Part 1: accounting concepts. *Journal of Industrial Ecology*, 5(1), 11-33.
- Hansen, R. (1971). The politics of Mexican development. En *El desarrollo económico reciente en México*. México D. F.: Contemporary Mexico.
- Harris, P. (2005). *El funcionamiento de la imaginación* (Trad. Mirta Rosenberg y Miguel Balaguer). Buenos Aires, Argentina: Fondo de Cultura Económica.
- Havilck, S. (1974). *The urban organism*. New York. MacMillan.
- Hawken, P. (2017). *Dragdown: The most comprehensive plan ever proposed to reverse global warming*. New York: Penguin Books.
- Haydea, I. (2001). Agua y sustentabilidad en la ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 47, 285-320.

- Heavens, N., Ward, D. y Manhowald, N. (2013). Studying and Projecting Climate Change with Earth System Models. *Nature Education Knowledge*, 4(5), 4.
- Hecklin, J. (2020). *2020 Doomsday Clock Statement, it is 100 seconds to midnight*. Chicago, EE. UU.: The Bulletin of the Atomic Scientist.
- Herbstaedt, C. (2012). *La fundación de Santiago. Efemérides*. Recuperado de: www.academiahistoriamilitar.cl
- Hermanowicz, S. & Asano, T. (1999). Abel Wolman's "The Metabolism of Cities" revisited: a case of study for water recycling and reuse. *Water Scientific Technology*, 40(45), 29-36.
- Hernández, C. (2004). *Las ideas modernas del Plan para Bogotá en 1950: el trabajo de Le Corbusier, Wiener y Sert*. Bogotá, Colombia: Instituto Distrital de Cultura y Turismo.
- Hernández, G. (1975). *De los chibchas a la Colonia y a la República; del clan a la encomienda y el latifundio en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Cultura.
- Heynen, N. (2016). Ecología política urbana: el siglo urbano. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal. *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI* (pp. 331-342). Ciudad de México, México: Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Hilbink, L. (2007). *Jueces y política en democracia y dictadura, lecciones desde Chile*. México D. F., México: Flacso México.
- Hollnagel, E. & Woods, D. D. (2005). *Joint Cognitive Systems: Foundations of Cognitive Systems Engineering*. Boca Ratón, EE. UU.: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ibarra, D. (1997). *Cosmogonía y mitología indígena americana* (2.ª ed.). Buenos Aires, Argentina: Kier.
- Ibarra, J., Leticia, E., García, O. y Guadalupe, S. (2009). El diésel para transporte en México, situación actual y prospectiva. *El Cotidiano*, 157, 65-74.
- Idrus, S., Hadi, A., Harman, A. & Mohamed, M. (2008). Spatial urban metabolism for livable city. *Blueprints for sustainable infrastructure conference*, 1, 1-11.
- Imaz, M. (2016). Hacia la construcción de ciudades resilientes y sustentables. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal, *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI* (pp. 235-248). Ciudad de México, México: Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Inostroza, L. (2013). El metabolismo urbano: un sistema de apropiación de excedentes ecológicos, la transformación de la estepa patagónica en arquitectura burguesa. *Urbano*, 29, 34-44.

- Institucional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (Inafed). (2018). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México: Distrito Federal*. Recuperado de: www.siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2016). *Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero*. Bogotá, Colombia: Ideam-PNUD.
- Instituto Metropolitano de Planeación. (2014). *Proyecciones poblacionales para Lima Metropolitana a los años horizonte 2018, 2021, 2025 y 2035 a nivel distrital*. Lima, Perú: IMP.
- Instituto Nacional de Antropología en Historia (INAH). (2018). *Museo del Templo Mayor*. México D. F., México: INAH.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2018). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*. Formulario web disponible en: www.inegi.org.mx
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2003). *Anuario estadístico sector eléctrico 2003*. Santiago, Chile: INE.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2016a). *Anuario estadístico de energía 2005-2015*. Santiago, Chile: INE.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2016b). *Informe anual 2016 sobre medio ambiente*. Santiago, Chile: INE.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2018). *Demografías y vitales*. Formulario web disponible en: www.ine.cl/estadisticas
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI). (2000). *Lima y Callao: compendio estadístico 1990-2000*. Lima, Perú: Dirección Nacional de Estadísticas e Informática Departamental.
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI). (2015a). *Compendio estadístico Perú 2015: electricidad, gas y agua*. Lima, Perú: Dirección Nacional de Estadística e Informática Departamental.
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI). (2015b). *Evolución de la pobreza monetaria 2009-2015, Informe Técnico*. Lima, Perú: Dirección Nacional de Estadísticas e Informática.
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI). (2018a). *Estadísticas de economía: principales indicadores macroeconómicos, producto interno bruto por departamento*. Formulario web disponible en: www.inei.gob.pe
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI). (2018b). *Estadísticas medio ambiente: residuos*. Formulario web disponible en: www.inei.gob.pe
- Integration-Proyecto de Cooperación Euro Latinoamericano (2013). *Vera-guas, propuesta piloto de revitalización sostenible de Bogotá-Colombia*. Bogotá, Colombia: Departamento de Protección Ambiental Stuttgart y Secretaría Distrital de Ambiente.

- Intergubernamental Panel for Climate Change (IPCC). (1990). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment (1990)*. New York. EE. UU.: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Jacob, F. (1999). *La lógica de lo viviente, una historia de la herencia*. Metatemas 59. Barcelona, España: Editorial Tusquets.
- Jaramillo, C. (2017). *Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca*. Cuenca. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Jaynes, E. (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. *Physics Review*, 106, 620-630.
- Jiménez, J. (1985). Las chinanpas. *Ciencias* (n. d.). 34-35.
- Juárez, J. y Comboni, S. (2012). Epistemología del pensamiento complejo. *Reencuentro*, 65, 38-51.
- K'Akumu, O. (2007). Sustain no city: An ecological conceptualization of urban development. *City*, 11(2), 223-230.
- Kahatt, S. (2014). Lima: cinco siglos de orden y caos, breve recuento del crecimiento y transformación socio espacial. *Revista Indexada de Textos Académicos*, 2, 38-43.
- Katz, B. (2016). La revolución metropolitana. *Urbana*, 69, 30-31.
- Kaztman, R. (2003). *La dimensión espacial en las políticas de superación de la pobreza urbana*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo 59. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.
- Keena, J. & Shapiro, A (1947). History and exposition of the Laws of Thermodynamics. *Mechanical Engineering*, 69, 915-921.
- Kennedy, C. (2009). *Urban metabolism. Green.view*. The Economist. London, United Kingdom: Global Agenda.
- Kern, D. (1982). *Heat Transfer Process*. New York, EE. UU.: McGraw Hill.
- Kish, K. (2018). A research agenda in ecological economics. En ISEE. *15th Congress International Society for Ecological Economics*. Puebla, México: International Society of Ecological Economics.
- Kotliarenco, M. y Dueñas, V. (2001). *Vulnerabilidad versus resiliencia: una propuesta de acción educativa*. Santiago de Chile, Chile: Mack Consultora.
- Krauze, E. (1987). Porfirio Díaz, místico de la autoridad. México D. F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Kung, T. (2013). *Teoría de las revoluciones científicas* (Trad. Carlos Solis Santos). México D. F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Kunzig, R. (2011). Solución urbana, el siglo urbano. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 29(6), 2-23.
- Landsberg P. (1986). La búsqueda de la certeza en un universo probabilístico. En Jorge Wagensberg (Ed.), *Procesos al azar*, Buenos Aires, Argentina: Tusquets.

- Lanfranchi, G., Verdecchia, C. y Bidart, M. (2017, enero). *ADN urbano: Aglomerado Gran Buenos Aires*. Documento de Política Pública. Buenos Aires. Centro de Implementación de Políticas Públicas para la Equidad y el Crecimiento.
- Laqueur, W. (2003). *La guerra sin fin: el terrorismo en el siglo XXI* (Trad. Ferrán Esteve). Barcelona, España: Destino.
- Las Vegas Valley Water District (LVVWD). (2018). *Water recycling*. Recuperado de 2018 de: <http://www.lvvwdd.com/water-system>
- Leal A. (2016). *Gentrificación y nuevas geografías sociales en la Ciudad de México*. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal, *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI* (pp. 477-492). Ciudad de México, México: Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Leff, E. (1998). *Saber ambiental: sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. México D. F., México: Pnuma-Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades y Ciencias.
- Levenspiel, O. (1981). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Barcelona, España: Reverté.
- Leopold, L. (1962). *The Concept of Entropy in Landscape Evolution*. Washington, EE. UU.: Geological Survey.
- Levine, R., Hughes, M., Mather, C. & Yanarella, E. (2008). Generating sustainable towns from Chinese villages: A system modelling approach. *Journal of Environmental Management*, 87, 305-316.
- Leyes de los Reinos de las Indias (1841). *Recopilación de 1841* (t. II, 5.ª ed.). Madrid, España: Calle de Carretas.
- Library of Congress (2018). *The Mexican revolution and the United States in the collection of the Library of Congress*. Disponible en: www.loc.gov/exhibits
- Llinás, R. (2014). The olivo-cerebellar system: a key to understanding the functional significance of intrinsic oscillatory brain properties. *Front Neural Circuits*, 7-96.
- Lope de Vega (1631). *La noche de San Juan*. Madrid. Manuscrito recuperado de: <http://www.cervantesvirtual.com>
- López, A. (2008). *De mitos, leyendas y cosmogonías en las tierras del Cóndor del Sur*. Córdoba, Argentina: Brujas.
- López, M. (2005). La administración del agua en México. En *Memorias del IV Foro Nacional del Agua*. Bogotá D. C., Colombia: Universidad Central.
- Lorenz, E. (2000). *La esencia del caos, un campo de conocimiento que se ha convertido en parte importante del mundo que nos rodea*. Madrid, España: Debate.

- Lukas, H., Fries, S. & Sundman, B. (2007). *Computacional thermodynamics: The Calphad Method*. London: Cambridge University Press.
- Luna, J. (2015). El metabolismo urbano rural del agua, actores sociales y gestión de los recursos hídricos público-urbanos de la ciudad de Cautla Morelos (2006-2013). *Revista de Geografía Espacios*, 5(10), 43-62.
- Lyotard, J. (1984). *The postmodern condition: a report on knowledge*. Translation from french by Geoff Bennington and Bryan Massumi. Minnesota, EE. UU.: University of Minnesota.
- Maani, K. (2017). *Multi-Stakeholder Decision Making for Complex Problems. A Systems Thinking Approach with Cases*. Singapore, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Macri, M., Chaín, D. & Lostri, H. (2011). *La ciudad producida*. En *Modelo territorial de Buenos Aires 2010-2060* (pp. 27-61). Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Desarrollo Urbano del Gobierno Autónomo de la Ciudad de Buenos Aires.
- Magnusson, W. (1996). *The search for political space; globalization, social movements and the urban political experience*. Toronto, Canadá: University of Toronto Press.
- Maldelbrot, B. (1997). *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona, España: Editorial Tusquets.
- Maldonado, C. (2005a). *Termodinámica y complejidad: una introducción para las ciencias sociales y humana*. Bogotá D. C., Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Maldonado, C. (2005b). Ciencias de la complejidad, ciencias de los cambios súbitos. *Odeom*, 2, 86-125.
- Maldonado, C. (2007). *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones*. Bogotá D. C., Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Maldonado, C. (2009). La complejidad es un problema, no una cosmovisión. *UCM Revista de Investigación*, 13, 42-54.
- 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*. London, United Kingdom: J. Johnson, in St Paul's Church-yard.
- Manrique, F. (2016). Mejores ciudades globales. En R. Santos, *Visión futuro de Bogotá*. Conversatorio llevado a cabo en el Ciclo de Conferencias de la Rectoría de la Universidad Central, Bogotá D. C., Colombia: Universidad Central.
- Margalef, R. (1986). Variaciones sobre el tema de la selección natural. Exploración, selección y decisión en sistemas complejos de baja entropía. En J. Wagensberg (ed.) *Procesos al azar* (pp. 121-140). Barcelona, España: Tusquets Editores.

- Margalef, R. (2002). *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona, España: Alfaomega Grupo Editor.
- Martine, G., McGranahan, G., Montgomery, M. & Fernández-Castilla, R. (2008). *The new global frontier: urbanization, poverty and environment in the 21st century*. London, United Kingdom: Earthscan.
- Martinelli, A. (2012). The possibility of a greater urban complexity: urban metabolism and urban project. En J. Acebillo. *A new urban metabolism* (pp. 175-182). Barcelona, España: ICUP, Academi Di Architettura, USI, Università Della Svizera Italiana.
- Martínez, C. (1978). Las tres plazas coloniales de Bogotá. En Cámara de Comercio de Bogotá. *Bogotá: estructura y principales servicios públicos* (pp. 356-380). Bogotá, Colombia: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Martínez, J. (2015). Opinión: La economía no es circular sino entrópica. *La Jornada*. Recuperado de: <http://www.jornada.unam.mx>
- Matos, M. (1984). *Desborde popular y crisis de estado: el nuevo rostro del Perú en la década de 1980*. Lima, Perú: Instituto de Estudios Peruanos.
- Matos, M. (2012). *Perú: Estado desbordado y sociedad nacional emergente*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- Mayorga, J. (2016). Producción del espacio urbano en Bogotá: la ciudad de los centros comerciales y los conjuntos cerrados. *Ciudades, Estados y Política*, 3, 7-18.
- McNamara, R. (1973). *Address to the board of governors*. Speech presented at the annual meeting of the World Bank in Nairobi, Kenia, September 4, report 42031: World Bank.
- Meadows, D., Meadows, D. y Randers D. (1992). *Más allá de los límites del crecimiento*. Madrid, España: El País Aguilar.
- Medina, A. (2014). Contexto social del debate sobre el control natal en Colombia en las décadas de 1980 y 1970: política, medicina y sociedad. *Historia, Ciencias y Salud*, 21(4), 1467-1473.
- Mejía, P. (2013). *La aventura urbana de América Latina*. Madrid, España: Fundación Mapfre-Santillana Ediciones Generales.
- Metrogás (2005). *Memoria anual Metrogás 2005*. Santiago, Chile: Metrogás.
- Milton Keynes Council (MKC). (2017). *Urban capacity study. Technical document*. Recuperado de: <http://www.milton-keynes.gov.uk>
- Ministerio de Economía (2016). *Proyecciones de población por municipio, Provincia de Buenos Aires 2010-2025*. Buenos Aires, Argentina: Subsecretaría de Coordinación Económica, Dirección Provincial Estadística.
- Ministerio de Energía y Minas (2018). *Consulta de precios y consumos en estaciones de servicio*. Formulario Web. Recuperado de: <http://res1104.se.gob.ar>

- Ministerio de Medio Ambiente. (2012). *Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero INGEI 2012, 2005 y actualización del INGEI 2001 y 2000*. Lima, Perú: Infocarbono.
- Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinComercio). (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular, cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. Bogotá, Colombia: MinAmbiente y MinComercio.
- Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. (2017). *Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento, Cobertura universal y sostenibilidad de los servicios*. Segunda versión, junio de 2017. Buenos Aires, Argentina: Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento.
- Misión Bogotá Siglo XXI. (1996). *El futuro de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Misión Bogotá-Siglo XXI.
- Molina P. (10 de septiembre de 2013). ¿Qué queda del modelo económico de Augusto Pinochet? *BBC Mundo*. Recuperado de: <https://www.bbc.com/mundo>
- Montaña, F. (2004). De Bogotá a Santafé: crecimiento urbano en el siglo XX. En C. Castiblanco. *Santafé en Bogotá: reconstrucción histórica, arquitectónica y turística de la localidad de Santafé* (pp. 63-78). Bogotá, Colombia: Corporación Horizontes y Alcaldía local de Santafé.
- Montoya-García, D., Adame Martínez, S., Cadena Vargas, E., Martínez Miranda, V., y Díaz-Álvarez, C. J. (2023). Metabolismo urbano de los municipios de Toluca y Metepec, estado de México, México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 25(2), 107-123. <http://orcid.org/0000-0002-9432-3155>
- Moore, S. (2009). How to measure a city's metabolism: taking stocks of London appetites. *IEEE Spectrum*, 44(6) 30-31.
- Moreno, G. (2016). *Capacidad de carga urbana y análisis espacio-temporal del crecimiento de la Paz BCS, México*. La Paz BCS, México: Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Morin, E. (1977/2009). *El método 1. La naturaleza de la naturaleza* (Trad. Ana Sánchez, en colaboración con Dora Sánchez). Madrid, España: Editions Du Seuil y Ediciones Cátedra.
- Morín, E. (1980, 2009). *El método 2. La vida de la vida* (5.ª ed., Trad. Ana Sánchez). Madrid, España: Editions Du Seuil-Ediciones Cátedra.
- Morín, E. (1986, 2009). *El método 3. El conocimiento del conocimiento* (Trad. Ana Sánchez). Madrid, España: Editions Du Seuil y Ediciones Cátedra.
- Morín, E. (1991, 2009). *El método 4. Las ideas* (Trad. Ana Sánchez). Madrid, España: Editions Du Seuil-Ediciones Cátedra.

- Morin, E. (1992). From the concept of system to the paradigm of complexity. *Journal of Social and Evolutionary Systems*, 15(4), 371-385.
- Morin, E. (1999). *Introducción al pensamiento complejo*. Buenos Aires, Argentina: Gedisa.
- Morin, E. (2006). *Restricted complexity general complexity. Proceeding*. 18-36. Recuperado de: <http://cogprints.org/5217/1/Morin.pdf>
- Morin, E. (2010). Complejidad restringida, complejidad general. *Revista Estudios*, VIII(93) 23-49.
- Morin, E. (2011). *La vía para el futuro de la humanidad* (Trad. Nuria Petit Fontseré). Barcelona, España: Paidós.
- Morin, E. y Kern, B. (1993). *Tierra-patria*. Buenos Aires, Argentina: Nueva Visión.
- Morin, E., Ciurana, R. y Motta, R. (2006). *Educación en la era planetaria*. Barcelona, España: Gedisa.
- Morin, E., Domínguez E. y Delgado C. (2018). *El octavo saber, diálogo con Edgar Morin*. México: Multiversidad Mundo Real Edgar Morin.
- Mulroney, M. (2013). An island wide assessment of the chronology of settlement and land use on Rapa Nui (Easter Island), based on radiocarbon data. *Journal of Archaeological Science*, 40(12), 4377-4399.
- Mundy, B. (2015). *The death of Aztec Tenochtitlan, the life of Mexico City*. Texas, EE. UU.: University of Texas.
- Munford, L. (1961). *The city in history*. New York, EE. UU.: Harcourt, Brace & Company.
- Municipalidad de Santiago. (2018). *Historia de la municipalidad*. Recuperado de: www.municipalidaddesantiago.cl
- Municipalidad Metropolitana de Lima. (2013). *Plan regional de desarrollo concertado de Lima 2012-2025*. Lima, Perú: Instituto Metropolitano de Planeación.
- Museo Nacional de Historia del Castillo de Chapultepec (MNH). (2018). *La joven nación. 1821-1867*. Sala de Historia. Museo Nacional de Historia. Ciudad de México, México: Museo Nacional de Historia del Castillo de Chapultepec.
- Naim, M. (2014, 20 de septiembre). Fácil equivocarse. *El País*, Recuperado de: https://elpais.com/elpais/portada_america.html
- Newman, P. (1999). Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*, 44, 219-226.
- Núñez, J. (1999). *La ciencia y la tecnología como procesos sociales*. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela.
- Newman, P. & Kenworthy, J. (1999). *Sustainability and cities: Overcoming automobile dependence*. Washington, EE. UU.: Island Press.

- Observatorio Ambiental de Bogotá (OAB). (2018). *Disposición de residuos sólidos en el relleno sanitario de Doña Juana, per cápita*. Formulario web disponible en: www.ambientebogota.gov.co
- Ocampo, J. (1994). *Historia básica de Colombia*. Bogotá, Colombia: Plaza y Janés Editores.
- Odum, E. (1998). *Ecología: El vínculo entre las ciencias naturales y las sociales*. México D. F., México: Continental.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa). (2012). *Consumo aparente de los principales alimentos en Chile*. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura.
- Open Calphad Group (OCG). (2018). *Calculation of phase diagrams-Calphad*. Aplicativo web disponible en: www.opencalphad.com
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin). (2012). *Análisis de la comercialización de combustibles líquidos en el Perú, año 2012*. Lima, Perú: División de Planeamiento y Desarrollo.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin). (2012, 2017). *La industria de la electricidad en el Perú, 25 años de aportes al crecimiento económico del país*. Lima, Perú: Osinerghmin.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (Onudi). (2023). *Distritos térmicos*. Disponible en: <https://www.distritoenergetico.com/>
- Ornelas, J. (2015). *Lo urbano y la crítica de la economía política en las zonas metropolitanas, reflexiones teóricas y estudios en el centro del país*. Tlaxcala, México: Universidad Autónoma de Tlaxcala-Porrúa.
- Orrego, J. (2013). *Lima 1. El corazón de la ciudad*. Lima, Perú: Aguilar.
- Ortiz, P., Delgado, A., Gómez, F. y Julián-Montañez, A. (2016). La energética social: una epistemología para la complejidad y la transdisciplina. En P. A. Ortiz, A. Delgado y F. Gómez. *Sistemas alejados del equilibrio, un lenguaje para el diálogo transdisciplinario* (pp. 19-58). Tlaxcala, México: Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Otterburg, K. y Roberts, S. (2016). Parques urbanos. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 38(4), 21-56.
- Owens III, R., Rossi-Hansberg, E. & Sarte, P. (2018). *Rethinking Detroit*. Technical document. Detroit, EE. UU.: Richmond. Federal Reserve Bank of Richmond and Federal Reserve System.
- Paes de Barros, R., Ferreira, F., Molinas, J. y Saavedra, J. (2008). *Midiendo la desigualdad en América Latina y el Caribe*. Bogotá, Colombia: Banco Mundial-Mayol Ediciones.
- Palau, G. (2002). *Introducción filosófica a las lógicas no clásicas*. Barcelona, España: Universidad de Buenos Aires y Gedisa.

- Parisi, F (2002). Entropy in property. *American Journal Computational Lab.*, 50, 595-632.
- Passuth, L. (2015). *El dios de la lluvia llora sobre México*. Ciudad de México, México: El Aleph.
- Pedraza, S. (1999). *En cuerpo y alma: visiones del progreso y la felicidad*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Persolosso, R., Gobattoni, F. & Leone, A. (2017). The low entropy city: a thermodynamic approach to reconnect urban system with nature. *Landscape and Urban Planning*, 168, 22-30.
- Perolosso, R., Gobattoni, F., Rip, M. & Leone, A. (2018). Second law of thermodynamics and the urban green infrastructure, a knowledge synthesis to address spatial strategies. *Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 11(1), 27-50.
- Piketty, T. (2014). *El capital en el siglo XXI* (1.^a ed. en español). Ciudad de Buenos Aires, Argentina: Fondo de Cultura Económica.
- Pirez, P. (1994). La formación de la ciudad metropolitana de Buenos Aires: de la riqueza al deterioro. *Eure XXI*, 61, 27-39.
- Pombo, C. (2017). *La Bogotá que seremos*. Bogotá, Colombia: Sociedad de Mejoras y Ornato de Bogotá.
- Posada, L. (1999). Nicholas Georgescu Roegen. *Ensayos de Economía*, 10(16), 149-168.
- Pradilla, E. (2015). Conflictos, movimientos sociales y política urbana en la Zona Metropolitana del Valle de México 1980-2014. En I. C. Ramos, J. O. Delgado y C. Hernández. *Las Zonas metropolitanas, reflexiones teóricas y estudios en el centro del país*. (pp. 75-101). Tlaxcala, México: Universidad Autónoma de Tlaxcala-Editorial Porrúa.
- Pradilla, E., Díaz, L., Hernández, D., Nemeth, F., Moreno, F., Pino, R., Santiago, C. y Valderrama, C. (2016). *Zona Metropolitana del Valle de México: cambios demográficos, económicos y territoriales*. México D. F., México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Predborska, I. (2013a). E Morin anthropo-ethics and its methodological potential for education. *Dragomanov U.*, 21(1) 17-20.
- Predborska, I. (2013b). E Morin's complexity paradigm in the context of international challenge of education. *Systems*, 1(3), 68-82.
- Preston, D. y McCurry, S. (2000). Los templos de Angkor. *Revista Oficial de la National Geograohic en Español*, 7(2), 82-103.
- Prigogine, I. (2008). *Las leyes del caos* (Trad. castellana de Juan Vivanco; revisión de Javier García Sanz). Barcelona, España: Crítica.
- Prigogine, I. (2012). *El nacimiento del tiempo*. Buenos Aires, Argentina: Tusquets.

- Prigogine, I. (1961). *Introduction to nonequilibrium thermodynamics*. New York, EE. UU.: Willey Interscience.
- Prigogine, I. (1986). Enfrentándose con lo irracional. En Jorge Wagensberg (Ed.) *Procesos al azar* (pp. 154-186. Trad. Joaquín Boya). Barcelona, España: Tusquets Editores.
- Prigogine, I. (1997). *El fin de las certidumbres* (Trad. Pierre Jacomet). Madrid, España: Grupo Santillana de Ediciones.
- Prigogine, I. (2008). *Las leyes del caos*. Barcelona, España: Crítica S. L.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2018). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de: <http://www.undp.org/content/undo/es/home>
- Purvis, B., Mao, Y. & Robinson, D. (2016). Thermodynamic entropy as an indicator for urban sustainability. *Urban Transition Conference, Procedia Engineering*, 198, 702-812.
- Quijano F. (2014, 8 de octubre). Mil porqués Bogotá no tiene metro. *La República*, pp. 5-6.
- Ramade, F. (1977). *Elementos de ecología aplicada*. Madrid, España: Ediciones Mundi Prensa.
- Ramón, G. (1999). *La muralla y los callejones: intervención urbana y proyecto político en Lima durante la segunda mitad del siglo XIX*. Lima, Perú: Sidea y Promperú.
- Ramos, E. (2015). El problema del suministro y consumo del agua potable en el Distrito Federal. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*. México, México: UNAM.
- Ramos, J. (2003). Empiricism in ecological economics: a perspective from complex system theory. *Ecological Economic*, 46(3), 387-398.
- Randers, J. (2012). *2052-A Global Forecast for the Next Forty Years*. London, Chelsea: Green Publications.
- Rapoport, E. (2011). *Interdisciplinary perspectives on urban metabolism; a review of the literature*. London, United Kingdom: University College London (UCL).
- Ravetz, J. (2006). Post normal science and the complexity of transitions toward sustainability. *Ecological Economics*, 3(4), 275-284.
- Real Academia Española (RAE). (2016). *Diccionario de la lengua española*. Edición del Tricentenario. Madrid, España: Real Academia Española y Asociación de Academias de la Lengua Española.
- Real Academia Española (RAE). (2018). *Diccionario de la lengua española*. Disponible en: www.rae.es
- Rebolledo, R. (2012-2013). Complejidad y azar. *Cuadernos de Filosofía*, 30-31, 194-119.

- Red de Observatorios para el Desarrollo Participativo (2010). *Informe de análisis socioeconómico de las metrópolis: Santiago*. Madrid, España: Observatorio Económico del Ayuntamiento de Madrid.
- Regalado, A. (2012). Un nuevo rostro para Río. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 31(4), 76-92.
- Regolini, C. & Junyent, R. (2009). *Sustainable urban design*. Conference city futures 2009. Madrid, España. [en línea] Disponible en: www.cityfutures2009.com
- Reguillo, R. (2005). *Horizontes fragmentados, el des(orden) global y sus figuras*. Guadalajara, México: Iteso.
- Repko, A. y Szostak, R. (2016). *Interdisciplinary research: process and theory*. London, United Kingdom: Sage Publications US.
- Restak, R. (1994). *Receptors*. New York. EE. UU.: Bantam Books.
- Reynoso, C. (2010). *Análisis y diseño de la ciudad compleja*. Buenos Aires, Argentina: Centro Editorial Javeriano.
- Reynoso, C. (2006). *Complejidad y caos: una exploración antropológica*. Buenos Aires, Argentina: SB.
- Reynoso, C. (2009). *Modelos o metáforas. Crítica del paradigma de la complejidad de Edgar Morin*. Buenos Aires, Argentina: SB.
- Ricardo, D. (1852). *The works*. London, United Kingdom: Murry & Street.
- Ricotta, G. (2017). En el territorio del enemigo: las unidades de policía de pacificación en una favela de Rio de Janeiro. *Antípoda, Revista de Antropología y Arqueología*, 29, 83-79.
- Rifkin, J. (1990). *Entropía, hacia el mundo invernadero* (Trad. Jordi Mustieles). Barcelona, España: Ediciones Urano.
- Rivera, R. (2010). Sobre el mito del arriero y el dominio masculino en un paraje de Acolhuacán Septemtrional. *Gazeta de Antropología*, 26(1), artículo 18.
- Rivera, R. (2018). *Manifestaciones del Orden-Rey en la evolución humana. Investigar desde el Pensamiento Complejo*. Ciudad de México: Multiversidad Mundo Real Edgar Morin.
- Roa, T. (2005). *Entropía cero: energía para la sostenibilidad*. Bogotá, Colombia: Censat Agua Viva.
- Rodríguez, A. y Oviedo, E. (2001). *Gestión urbana y gobierno de áreas metropolitanas*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo n.º 34. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.
- Rodríguez, J. (2003). El acueducto colonial, la diosa agua y la tubería de hierro. En *El agua en la historia de Bogotá (1538-1937)* (t. I, pp. 1- 230). Bogotá: Villegas Editores-Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

- Rodríguez, L., et al. (2018). *La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina: desafíos, contribuciones y compromisos para abordar los problemas complejos del siglo XXI*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Comunidad Editora Latinoamericana.
- Rodríguez, L. y Aguirre, J. (2011). Teorías de la complejidad y ciencias sociales: nuevas estrategias epistemológicas y metodológicas. *Nómadas, Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas*, 30, 1-21.
- Román, M. (1997). Las grandes ciudades del Indo. *Historia Antigua, espacio, tiempo y forma. Serie II*, 10, 23-33.
- Romero, J. (2007). *Latinoamérica: las ciudades y las ideas*. Buenos Aires, Argentina: Siglo XXI Editores.
- Romero, P., Rosas, A. y Gnatz, D. (2016). Capacidad institucional de respuesta al cambio climático: un examen de su construcción en México y Santiago de Chile. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal. *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI, Ciudad de México* (pp. 277-310). Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Roughgarden, J. (1998). *Primer of Ecological Theory*. New Jersey. EE. UU.: Prentice-Hall Inc.
- Roughgarden, J. & Smith, F. (1996). Why fisheries collapse and what to do about it. *Protection National Academy EE.UU.*, 93, 5078-5083.
- Royte, E. (2016). Feo pero rico. *Revista Oficial de National Geographic Society*, 38(3), 23-49.
- Rowland, T. (2019). *Functional*. En MathWorld, Wolfram Web Resource. Recuperado de: <http://mathworld.wolfram.com/Functional.html>
- Ruelle, D. (1995). *Azar y caos*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Russell, L. & Adebisi, G. (1993). *Classical thermodynamics*. Florida, EEUU.: Saunders College Publishing.
- Sabatini, F. (2016). ¿Podemos construir ciudades menos segregadas? En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal. *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI, Ciudad de México* (pp. 439-456). Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Saborlo S. (2007). Policía pacificadora, legitimidad y prácticas de ocupación territorial. *Antípoda Revista de Antropología y Arqueología*, 29, 105-122.
- Sáenz de Oiza, J. (2006). *Francisco Javier Sáenz de Oiza: escritos y conversaciones*. Barcelona, España: Fundación Caja de Arquitectura.
- Sagrada Biblia Nacar-Colunga. (1965). *Libro de la Sabiduría*. Madrid, España: Biblioteca de Autores Cristianos (BAC).

- Saito, H. (2018). *Agglomeration economies: productivity and quality upgrading*. 15th PRSCO Summer Institute. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Salcedo, A. y Zeiderman, A. (2008). Antropología y ciudad: hacia un análisis crítico e histórico. *Antípoda*, 7, 63-97.
- San Cristóbal, A. (2011). *Arquitectura virreinal religiosa de Lima*. Lima, Perú: Universidad Católica Sedes Sapientiae.
- Sánchez, A. (2016). Hacia un nuevo paradigma de la economía urbana y regional en México. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal. *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI, Ciudad de México* (pp. 137-158). Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios Sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Sánchez-Rodríguez, R. (2008). Urban sustainability and global environmental change: reflections for an urban agenda. En G. Martine *et al.* (Eds.). *The new global frontier: urbanization, poverty and environment in the 21st century* (pp. 149-164). London, United Kingdom: Earthscan.
- Sánchez, A., Ramírez, R., Buenrostro, E. y Victoria, A. (2011). *La evolución de la ciudad de México*. México D. F.: Consejo de Evaluación del Desarrollo Social del Distrito Federal.
- SAP (2018). *Ciudades futuras*. Disponible en: www.sap.com/latinoamerica
- Schteingart, M. (2016). Infraestructura y división del espacio en las ciudades. En L. Álvarez, G. C. Delgado y A. Leal. *Los desafíos de la ciudad del siglo XXI, Ciudad de México* (pp. 213-234). Senado de la República-UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Programa Interuniversitario de Estudios sobre la Ciudad y Programa Interuniversitario de Estrategias para la Sustentabilidad.
- Schlickewei, U. (2016). La urbanización como motor de la prosperidad. *Urbana*, 69, 32.
- Schrödinger, E. (1945). *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Scobie, J. (1974). *Buenos Aires, Plaza to Suburb 1870-1900*. New York. EE. UU.: Oxford University Press.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. (2016). *Pérdida y desperdicio de alimentos en Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Dirección de Agroalimentos.
- Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México. (2018). *Oficina virtual de información económica*. Formulario disponible en: <http://www.sedecodf.gob.mx/sedeco/>
- Secretaría de Desarrollo Económico del Distrito Federal. (2014). *Reporte económico de la ciudad de México*. Formulario disponible en: <http://www.sedecodf.gob.mx/sedeco/>

- Secretaría de Energía (Sener). (2002). *Prospectiva del mercado de gas natural 2002-2011*. México D. F., México: Sener.
- Secretaría de Energía (Sener). (2015). *Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029*. Ciudad de México, México: Sener.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (Sedema). (2015). *Inventario de emisiones de la CDMX: contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero*. Ciudad de México: Sedema.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). (2014). *Inventario de emisiones de gases efecto invernadero de Bogotá D. C., línea base, metodología IPCC 2006*. Bogotá, Colombia: Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual.
- Secretaría Distrital de Hacienda (SDH). (2014). *Proyecto presupuesto anual distrital 2014*. Bogotá, Colombia: SDH.
- Secretaría Distrital de Planeación (SDP). (2015). *Altos de la Estancia, nueva zona para el entretenimiento y recuperación ambiental*. Boletín de prensa. Recuperado de: <http://www.sdp.gov.co>
- Secretaría Regional Ministerial de Planeación y Coordinación. (2011). *Análisis de las series de Producto Interno Bruto 2003-2010: Región Metropolitana de Santiago*. Santiago, Chile: Región Metropolitana de Santiago.
- Segovia, O. y Roldán, R. (2005). *Espacios públicos urbanos, pobreza y construcción social*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo n.º 122. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.
- Sen, A. (1999). *The possibility of social choice*. *American Economy Review*, 89(3), 349-378.
- Sen, A. (1987). *On ethics and economics*. Oxford, United Kingdom: Basil Blackwell.
- Sen, A. (2000). *Freedom, rationality and social choice, the arrow lectures and others essays*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Serna, M., Morales, T. y Guerrero, J. (2014). Análisis de flujos de agua en áreas metropolitanas desde la perspectiva del metabolismo urbano. *Luna Azul*, 39, 234-249.
- Serpa, J. (1999). *Rojas Pinilla. Una historia del siglo XX*. Bogotá, Colombia: Planeta.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (Sedapal). (2010). *Sedapal no factura el 37,7% del agua*. Recuperado de: www.archivo.elcomercio.pe
- Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technology Journal*, 27, 379-423.
- Shiva, V. (2005). *Earth democracy: justice, sustainability and peace*. Massachusetts, EE. UU.: Cambridge Press.
- Showkowski, E. (1989). *Cálculo con geometría analítica Ciudad de México*, México: Grupo Editorial Iberoamericana.

- Silvestre, F. (1789). *Descripción del Reyno de Santafé de Bogotá*. Editada por la Universidad Nacional de Colombia en 1968. Bogotá, Colombia: Editorial Carbel.
- Simpich, F. (1930). La gran metrópoli contemporánea, vocación capitalina, texto original de 1930. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 33(5), 12-18.
- Singh, R. y Singh, P. (2017). *Global environment problems, principles and applications of environmental technology for a sustainable future, applied environmental science and engineering*. Singapore, Singapore: Springer.
- Smith, A. (1776). *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations*. London, United Kingdom: Straham y Cadell.
- Smith, C. y Corripio, A. (1997). *Control automático de procesos, teoría y práctica*. México D. F., México: Editorial Limusa.
- Smith, C. y Corripio, A. (2008). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. México D. F., México: Limusa.
- Smith, D. (2017). Globalizing social problems: an agenda for the twenty-first century. *Social Problems*, 64(1), 1-13.
- Smith, G. (1979). *Epilogue: Malthusian concern from 1800 to 1960 in the morality of scarcity: limited resources and social policy*. Baton Rouge, EEUU.: Louisiana State University Press.
- Smith, J., VanNess, H. & Abbot, T. (1996). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. New York, EE. UU.: McGraw-Hill.
- Smith J., VanNess, H. & Abbot, T. (1997). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química* (Trad. Edmundo Urbina). México D. F., México: McGraw-Hill.
- Sirkin, G. (1962). *Introducción a la teoría macroeconómica*. México D. F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SNiChile). (2018). *Resultados regionales: metropolitana*. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
- Software & Services in Process Simulation (ProSim). (2018). *ProPhyPlus, software of simulism thermodynamics*. Disponible en: www.prosim.net.
- Sokal, A. & Bricmont, J. (1997). *Imposturas intelectuales*. Madrid, España: Paidós Ibérica.
- Solana, J. (2011). El pensamiento complejo de Edgar Morin. Críticas, incomprendiones y revisiones necesarias. *Gazeta de Antropología*, 27(1), artículo 09.
- Speckman, E. (2016). *El porfiriato*. En P. Escalante et al. (Eds.). *Nueva historia mínima de México* (pp. 192-224). Ciudad de México, México: El Colegio de Morelos.
- Stehberg, R. y Sotomayor, G. (2013). *Mapocho incaico*. Santiago. Chile: Museo Nacional de Historia Natural.

- Stepanic, J., Stefancic, H., Zebec, M. S. & Perackovic, K (2000). Approach to a quantitative description of social systems based on thermodynamic formalism. *Entropy* 2000, 2, 98-105.
- Stephens, G. & Wikstrom, N. (2000). *Metropolitan Government and Governance: Theoretical perspectives, empirical analysis, and the future*. New York, EE. UU.: Oxford University Press.
- Stearns, T. (1934). *The rock, T. S. Elliot collected poems, 1909-1962*. New York, EE. UU.: Harcourt, Brace & World Inc.
- Stern, N. (2009). *The economic crisis and the two great challenges of the 21st century*. London, United Kingdom: London Economics School.
- Strogatz, S. (2003). *Sync: How order emerges from chaos in the universe, nature and daily life*. New York, EE. UU.: Hyperion.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios). (2015). *Informe sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado, grandes prestadores*. Bogotá, Colombia: Superservicios y DNP.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS). (2018). *Robos y fallas en redes sanitaria*. Recuperado de: www.siss.gob.cl
- Sustainable Development Solutions Network (UNSDSN). (2017). *Cómo implementar los ODS en las ciudades; un manual introductorio para quienes trabajan en el ámbito del desarrollo urbano sostenible*. New York, EE. UU.: UNSDSN-German Cooperation.
- Sutton, D. (1980). *Fundamentos de ecología*. Ciudad de México, México: Limusa.
- Swyngedouw, E. (2006). *Metabolic urbanization: the making of cyborg cities. The nature of cities: urban political ecology and the politics of urban metabolism*. London, United Kingdom: Routledge.
- Szklowin, C. (1984). *Aspectos socioeconómicos del AMBA*. Buenos Aires. Argentina: Centro de Planificación Urbana.
- Tacoli, C., McGranahan, G. & Satterthwaite, D. (2008). Urbanization, poverty and inequity: Is rural-urban migration a poverty problem, or part of the solution? En G. Martine et al. (Eds.), *The new global frontier: urbanization, poverty and environment in the 21st century* (pp. 37-54). London, United Kingdom: Earthscan.
- Tapia, M. (2012, 11 de mayo). Consumo de bebestibles crece un 40% en 10 años. *Economía y Negocios*, 12.
- Tayler, N. (2018). *Liveable cities*. Recuperado de: <http://liveablecities.org.uk/people/nick-tyler>
- Testa, J., Bertoni, M. y Maffioni, J. (2017). *Análisis de los ciclos de metabolismo urbano para una ciudad turística sustentable y competitiva, el caso de Miramar (Buenos Aires, Argentina). Desafíos del Turismo para el Desarrollo Sostenible*. Mar del Plata, Argentina: Universidad del Mar del Plata.

- Thatcher, M. (1989). *Commonwealth partners at odds over environmental problems*. "Globe and Mail". Toronto, Canadá: Margaret Thatcher Foundation.
- ThermoCalc Software (2018). *Software*. Disponible en: www.thermocalc.com
- Thom, R. (1990). *Esbozo de una semiofísica: física aristotélica y teoría de las catástrofes*. Barcelona, España: Gedisa.
- Thurrow, L. (1981). *La sociedad de suma cero*. Barcelona, España: Ediciones Orbis.
- Toledo, V. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económica-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 1-26.
- Torres, B. (2017). *Gestión del agua potable en la ciudad de México, retos hídricos para la CDMX: gobernanza y sustentabilidad*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Administración Pública.
- Torres, R., García, A. y Rojas, J. (2017). Privatizando el agua, produciendo sujetos hídricos; análisis de las políticas de escala en la movilización sociohídrica contra Pascua Lama e HidroAyre en Chile. *Agua y Territorio*, 10, 149-166.
- Turner, V. (1974). *Dramas, fields and metaphors, symbolic action in human society*. London, United Kingdom: Cornell University Press.
- Turner, V. (1986). *The anthropology of performance*. New York, EE. UU.: PAJ Publication.
- Tyrtania, L. (2009). *Evolución y sociedad, termodinámica de la supervivencia para una sociedad a escala humana*. México D. F., México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- United Nation Human Settlements Programme-Un Habitat (2018). *City prosperity initiative*. New York. EE. UU.: UnHabitat.
- United Nations-UN (2018). *Sustainable Development Goals, 17 goals to transform our world*. Recuperado de: <http://www.un.org/sustainabledevelopment>
- United Nations-UN (2000). *Informe del Milenio del Secretariado General*. New York. EE. UU.: Naciones Unidas. Recuperado de: <http://www.un.org/spanish/milenio>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs-UNDesa (2008). *World urbanization prospects: the 2007 revision*. New York, EE. UU.: Undesa.
- United Nations Development Program (2009). *Informe sobre el Desarrollo Humano*. Disponible en: <http://undp.org/es/desarrollohumano/origenes/>
- United Nations Environmental Program-UNEP (2012). *Global environment outlook 5, summary for policy makers*. New York, EE. UU.: UNEP.

- United Nations Human Settlements Programme-UNHabitat (2011). *State of the World's Cities 2010/2011: Brinding the urban divide*. London, United Kingdom: UN Habitat.
- University of Maryland (UMD). (2020). *Sustainable UMD: Terps leave small footprints*. Recuperado de: <http://sustainability.umd.edu/>
- Vance, E. y Coventry, D. (2016). El imperio perdido de los mayas. *Revista Oficial de la National Geographic en Español*, 39(3), 25-39.
- Vanegas, C. (2012). La formación de urbanistas como alternativa para contribuir al desarrollo y la planeación urbana y territorial en Colombia. *Anales de Ingeniería*, 124(921), 39-43.
- Vargas, L. (1990). *La sociedad de Santafé Colonial*. Bogotá D. C., Colombia: Cinep.
- Vera, R., Paredes, C. y Defilippi, E. (2013). *Mercado eléctrico en el Perú: balance de corto plazo y agenda pendiente*. Lima, Perú: Universidad de San Martín de Porres.
- Verma, H. (1992). *Concepts of Physics*. New Dheli, India: Bharti Bhawan.
- Villalba, L. (2016). *Metabolismo urbano de Tandil, uso en la gestión de los residuos sólidos urbanos*. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata.
- Volner, I. (2017, 28 de noviembre). What the architects of the high line are up to next. *The Wall Street Journal Magazine*. Recuperado de: <https://www.wsj.com/>
- Watson, J. & Lovelok, J. (1983). Biological homeostasis of the global environment: The Parable of Daisy World. *Tellius*, 35B, 286-289.
- Waxman, O. (2014, 3 de mayo). From fat trains to collapsing bridges: 8 famous engineering mistakes. *Time Magazine*. Recuperado de: <http://time.com>
- Weaver, D. (2016). *Social problems in the 21st century*. New York, EE. UU.: Kendall Hunt Publisher.
- Wesselink, A. & Hoppe, R. (2011). If post normal science in the solution. What is the problem? The politics of activist. *Environmental Science: Science, Technology and Human Activities*, 36(3), 389-412.
- Whitaker, I. (2014, 24 de agosto). How our water goes from the toilet to the tap. *Las Vegas Sun*. Recuperado de: <https://lasvegassun.com/>
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: or, Control and Communication in the Animal and the Machine*. Nueva York, EE. UU.: J. Wiley.
- Wiesner, F. (1978). Reseña del alcantarillado de Bogotá. En *Bogotá: estructura y principales servicios públicos* (pp. 1, 329). Bogotá, Colombia: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Winchester, L. (2006). *El desarrollo sostenible de los asentamientos humanos en América Latina y el Caribe*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo n.º 99. Santiago de Chile, Chile: División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de las Naciones Unidas-Cepal.

- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213, 1-17.
- Womack, J. (2012). La economía de México durante la Revolución 1910-1920: historiografía y análisis. *Argumentos*, 25(69), 13-56.
- World Economic Forum (WEF). (2017a). *The global competitiveness report 2017-2018*. Geneve, Suisse: World Economic Forum.
- World Economic Forum (WEF). (2017b). De ciudades emergentes a ciudades sostenibles: la oportunidad de las ciudades latinoamericanas. En *Ciudad y urbanización*. Disponible en: <http://es.weforum.org/agenda>
- World Health Organization (WHO). (2020). *Coronavirus disease (COVID-19) Pandemic*. Disponible en: <http://www.who.int/emergencies>
- Yamujar, R. (2006). Una mirada a los servicios de saneamiento. En *Coyuntura, Análisis Económico y Social de Actualidad*. Lima. Pontifica Universidad Católica del Perú.
- 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
- Zambrano Pantoja, F. (2002). De la Atenas Suramericana a la Bogotá moderna. La construcción de la cultura ciudadana en Bogotá. *Revista de Estudios Sociales*, 11, 9-16.
- Zambrano, F., Castelblanco, C., Montañó, F. y Peña, C. (2003). *Santa Fe en Bogotá: reconstrucción histórica, arquitectónica y turística de la localidad de Santa Fe*. Bogotá, Colombia: Corporación Horizontes-Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Zhang, Y., Yang, Z. & Yu, X. (2009a). Ecological Network and emergy analysis of urban metabolic systems: model development and case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, 220, 1431-1442.
- Zhang, Y., Yang, Z. & Yu, X. (2009b). Evaluation of urban metabolism based on emergy synthesis: a case study for Beijing China. *Ecological Modelling*, 220, 1690-1696.
- Zill, D. (1997). *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones* (3.ª ed.) Bogotá, Colombia: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Zimmer, C. (2014). Secretos del cerebro. *Revista National Geographic en Español*, 34(02), 22-53.
- Zoraida, J. (2016). De la independencia a la consolidación republicana. En P. Escalante. *Nueva historia mínima de México* (pp. 137-191). Ciudad de México, México: El Colegio de Morelos.
- Zurita, F. (2007). *¿Nos estamos ahogando en basura?* Santiago de Chile: Centro de Estudios Políticos (CEP).

Glosario

Ciudad: Sistema vivo (Díaz, 2014; Díaz y Pulecio, 2016), Superorganismo urbano (Zhang, 2009a y 2009b), Organismo cibernético (Swyngedouw, 2006), Sistema complejo y dinámico (Newman, 1999), Área metropolitana viviente (Moore, 2007), Sistema insumo-producto (Adams, 2007), Organismo en viva transformación (Sáenz de Oiza, 2006) y Maravillosa máquina compleja (Agulles, 2017).

Entropía: Propiedad extensiva no conservativa de un sistema, con valores fijos en estados fijos, correspondiente a energía degradada que siempre va en aumento (Cengel y Boles, 2012), definida como $\delta S \geq \delta Q/T$ (Smith, Van Ness y Abbott, 1997).

Equilibrio: Estado de un cuerpo cuando la suma de todas las fuerzas y momentos que actúan sobre este se contrarrestan (Verma, 1992). Condición de estado de sistemas donde se presentan reacciones opuestas con igual velocidad de ocurrencia, definiendo así una constante (K_e) que depende de la concentración de las sustancias químicas existentes en el medio (Brown y LeMay y Bursten, 1993, p. 583).

Estado estable: Condición de estado de régimen permanente en donde los valores de las variables de proceso no sufren modificación alguna a través del tiempo (Gooding, 1997, p. 89); cuando el flujo de masa y calor hacia adentro y afuera del sistema es constante (Kern, 1982, p. 26); y cuando las velocidades de cambio en el sistema pueden considerarse nulas sin error apreciable (Levenspiel, 1981, p. 20). Estado que se alcanza gracias a estructuras internas que actúan cuando se presenta alguna perturbación, o cuando —por alguna razón— el sistema no se encuentre en su estado inicial (Roughgarden, 1998, p. 126).

Estado transitorio: Condición de estado inestable que se presenta cuando alguna de las variables cambia su valor con el tiempo (Gooding, 1997, p. 89); cuando los flujos de calor y/o la temperatura varían con el tiempo en un punto fijo (Kern, 1982, p. 713); o cuando los productos que se forman se encuentran en lo máximo de la curva de energía (Levenspiel, 1981, p. 20).

Funcional: Expresión matemática tipo función, cuyo dominio es un conjunto de funciones; es decir, una función que toma funciones como su argumento; Por tanto, es una ecuación donde existen varios conjuntos de variables desconocidas. Sin embargo, desde la rigurosi-

dad matemática, es una función con valor real en un espacio vectorial V usualmente de funciones (Bouvier y George, 2005; Rowland, 2019).

Homeostasis: Conjunto de funciones de autorregulación que conduce al mantenimiento de la constancia en la composición y propiedades del medio interno del organismo al ser influidos por agentes externos (Barnsley, 2007; RAE, 2009).

Retroalimentación negativa: Proceso en el cual un sistema responde para recuperar su condición inicial o estado de equilibrio (Bertalanffy, 1994, 2006).

Pseudoestabilidad: Condición de estado de un sistema complejo en un momento infinitesimal, en el que los valores de las variables son constantes, así como el flujo de materia, energía e información. Singularidad que no perdura en el tiempo a causa del flujo y transferencia de la masa y el calor, que implican un cambio continuo hacia un estado transitorio (definición propia).

Sistema: Conjunto de elementos en interacción, compuesto por límites, elementos, redes de comunicación e información que cumplen una función determinada (Bertalanffy, 2006).

Sistema complejo: Sistema que está constituido por elementos heterogéneos que solo permiten una descomposición parcial, dispuestos en múltiples niveles de organización y con dinámicas propias e interactuantes entre sí. Sistema que presentan sensibilidad a las condiciones iniciales y de contorno debido al intercambio de materia, energía e información; que mantiene estructuras ordenadas y pseudoestables en condiciones muy alejadas del equilibrio y donde el caos es el resultado natural del desenvolvimiento y la ruptura simétrica del tiempo; sistema cuyos horizontes predictivos son muy cortos, definidos principalmente por la no linealidad, la inercia y el efecto mariposa (Cilliers y Niculescu, 2012; Ciurana, 2007; García, 2006; Morin, 1999).

Sostenibilidad: Calidad de sostenible, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar daño al medio ambiente (RAE, 2018),

Sostenibilidad ambiental urbana: Capacidad para producir y consumir bienes y servicios con el fin de satisfacer las necesidades humanas en una ciudad o asentamiento humano, en una relación no

destructiva con la naturaleza; respetando sus límites de regeneración y capacidad de carga (PNUD, 2018; UMD, 2020; Zarta, 2018).

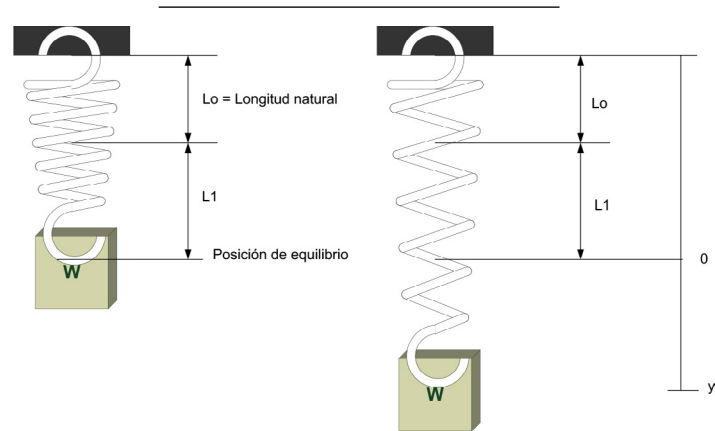
Termodinámica: Ciencia de la complejidad que estudia la energía y sus transformaciones (Cengel y Boles, 2012; Prigogine, 2012; Smith, Van Ness y Abbott, 1997).

Anexo 1.

**Movimiento armónico simple
y retroalimentación negativa**

El sistema masa-resorte que experimentará la vibración permitiría explicar —en una primera aproximación— un sistema que experimenta una perturbación y evidencia una retroalimentación (figura 1). Siendo el símil: masa es a perturbación como fuerza de restitución es a retroalimentación. Esta comparación permite desarrollar las bases para la comparación de la homeostasis con el fenómeno de la vibración con amortiguamiento.

Figura 1. Representación de la ley de Hook y la segunda ley de Newton en el sistema masa-resorte



Según la Ley de Hook, la fuerza que se necesita para estirar un resorte y unidades a partir de su longitud natural es ky , para algún número natural real positivo k , que se llama constante de fuerza del resorte. La fuerza restauradora del resorte es $-ky$ (Swokowski, 1989, 1012). Después de que una masa m se sujeta al resorte, ésta lo alargará en una magnitud y alcanzando la posición de equilibrio en la cual su peso W se equilibra con la fuerza de restitución (Zill, 1998, 206), siendo el peso una relación de masa por aceleración de la gravedad.

Ley	Fuerza	Símil
Ley de Hook	Restauradora	Capacidad de retroalimentación
Ley de Newton	Acción sobre el sistema	Perturbación, señal contaminante

Fuente: elaboración propia con información de Swokowski (1989) y Zill (1998).

La primera aproximación al modelado de la homeostasis urbana es considerar un sistema sin esta propiedad. Por tanto, la representación del sistema masa-resorte ante la perturbación oscilaría en un medio sin fricción, sin que en este exista una fuerza adicional en

contra del movimiento (solo la fuerza de restitución); ante la cual, la representación matemática sería:

$$F = mg - k(l_1 + y) = mg - kl_1 - ky = -ky \quad \text{Ec. 1}$$

La importancia del signo negativo de la fuerza de restitución del resorte indica que esta actúa en dirección opuesta a la del movimiento, comportándose como una retroalimentación negativa del sistema.

Ahora bien, considerando la fuerza como una expresión de una masa que sufre una aceleración, y la aceleración como la variación de la velocidad por unidad de tiempo, se obtiene:

$$F = ma \quad \text{y} \quad a = \frac{d^2y}{dt^2} \quad \text{Se tiene por sustitución:} \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = -ky \quad \text{Ec. 2}$$

Posteriormente, al dividir ambos lados de la ecuación entre la masa m , se tiene una ecuación diferencial que define la vibración sin amortiguamiento; es decir, aquel sistema natural que ante una perturbación solo cuenta con una retroalimentación negativa para poder restituir su estado natural:

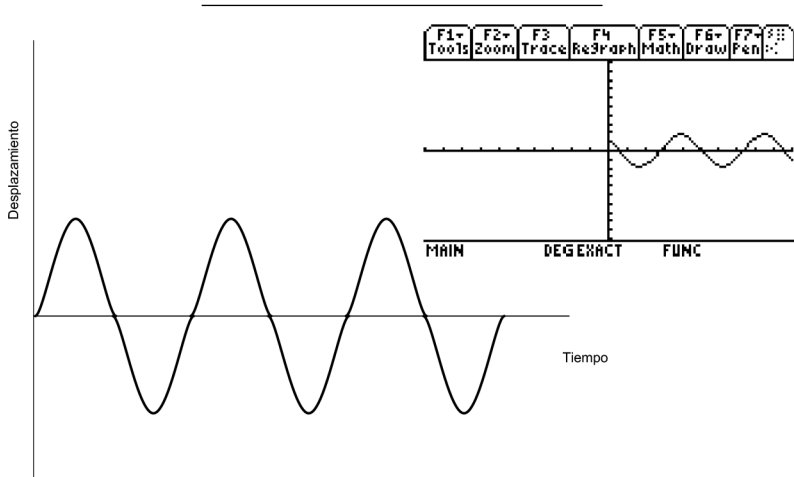
$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{k}{m}y = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

La ecuación 4 establece que la holgura o amplitud de la oscilación y el desplazamiento de la señal contaminante (perturbación) dependerán de la capacidad intrínseca de retroalimentación negativa del sistema, propiamente de la constante de restitución y de la cantidad de masa (m) existente. Su solución general, según el teorema de Euler, es:

$$y = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t, \text{ donde: } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ec. 4}$$

La representación gráfica (figura 2) evidencia que un sistema sin homeostasis, que sea perturbado por un flujo de materia o energía, experimentará una oscilación producto de la vibración que perdurará indefinidamente en el tiempo. Caso teórico que describe el movimiento armónico simple o movimiento libre no amortiguado, el cual aplica solo a sistemas mecánicos ideales suspendidos en el vacío.

Figura 2. Solución gráfica de un sistema mecánico ideal que no exhibe homeostasis tras una perturbación

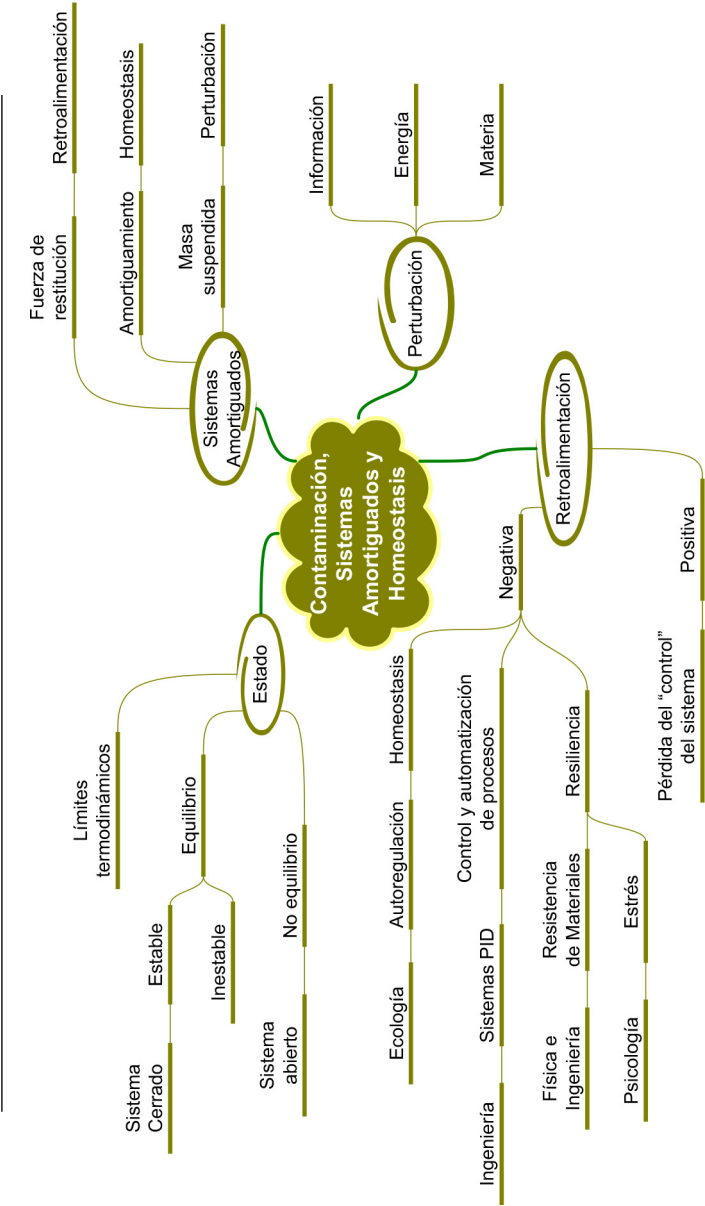


Fuente: elaboración propia con información y gráfico generado del modelado matemático de la ecuación diferencial (Ec. 4) con el *software* de la calculadora TI-98.

Sin embargo, esta idealidad es útil para identificar los puntos máximos de desplazamiento que se pueden alcanzar después de la perturbación. Extremos importantes que hay que tener en cuenta para identificar los límites de estabilidad del sistema.

Un posterior desarrollo, según la mecánica de los sistemas vibratorios, permitirá proponer la respuesta homeostática y la retroalimentación negativa para los sistemas abiertos, propiamente las ciudades y asentamientos humanos (figura 3).

Figura 3. Estructura conceptual que sustenta la propuesta descriptiva y de aproximación matemática a la capacidad homeostática con apoyo en los sistemas amortiguados



Fuente: elaboración propia.

Anexo 2.

Método de proyección para el metabolismo urbano 2025

La proyección realizada para determinar el posible esquema metabólico urbano para el año 2025 en las cinco ciudades capitales de Latinoamérica se fundamentó según un supuesto sin introducción de cambios sustanciales sobre cada uno de los sistemas complejos (BAU, por sus siglas en inglés); por tal motivo, el método matemático utilizado fue el Pronóstico Lineal Suavizado según los supuestos de relación enunciados en la tabla 1.

Tabla 1. Supuestos de relación entre los elementos de estudio para el metabolismo urbano de las ciudades capitales analizadas^(a)

Elemento	Función
Producto interno bruto	$PIB = f(Población, energía)$
Energía	$Energía = f(Población, PIB)$
Combustibles	$Combustibles = f(Población, PIB)$
Alimentos	$Alimentos = f(Población, PIB)$
Bebida	$Bebidas = f(Población, PIB, Temperatura)$
Basuras	$Basuras = f(Población, PIB)$
Gases efecto invernadero	$GEI = f(Población, combustibles, PIB)$

^(a) Esta proyección, según este supuesto, es totalmente maltusiana, al considerar la población como el mayor determinante del consumo, seguido del PIB.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, es importante aclarar que la predicción de estos sistemas complejos es posible cuando algunos procesos del estado termodinámico alcanzan pseudoestabilidades que permiten formular reglas que describen parcialmente su comportamiento (Adams, 2007).

Ninguna ciudad puede declarar, con total certeza, que es sostenible y que tiene asegurada su supervivencia en el siglo XXI. En tan solo su primer cuarto, se vislumbra un Armagedón en las dimensiones social, financiera, ambiental y política. Desde la indisposición de las personas y colectivos ante el espejismo urbano, revelado por la reproducción de la pobreza, la desigualdad y la inseguridad, hasta las crisis financieras, la gentrificación y los desastres naturales —que cobran vidas debido a precipitaciones repentinas que superan los valores históricos y olas de calor en periodos secos—, los grandes asentamientos humanos exigen que los tomadores de decisiones y los gestores de políticas públicas superen el pensamiento lineal frente a la realidad compleja.

En esta línea de argumentos, y fruto de una investigación doctoral en sistemas complejos y de la experiencia del autor en consultoría ambiental en entornos urbanos, este libro revela la cruda realidad ambiental detrás de los indicadores económicos y sociales tradicionales que, habitualmente, se utilizan para demostrar el aparente logro de la ciudad sobre la ruralidad.

La situación se expone mediante el concepto de metabolismo urbano y desde la perspectiva de la principal ciencia de la complejidad: la termodinámica. Se concibe la ciudad como un organismo vivo que, para mantenerse en el tiempo, satisfacer las necesidades insaciables de su población y competir en un mundo globalizado, consume enormes cantidades de energía, agua, alimentos y combustibles. Al mismo tiempo, produce una gigantesca carga contaminante, expresada en residuos sólidos, emisiones, vertimientos, radiación no ionizante y disipación de energía.

Para demostrar la insostenibilidad de las ciudades latinoamericanas, el autor presenta un estudio comparativo del metabolismo urbano de cinco centros urbanos entre los años 2000 y 2025: Bogotá, Buenos Aires Ciudad, Ciudad de México, Lima y Santiago. Asimismo, enfocándose en la energía, analiza cada ciudad como una máquina térmica compleja, aplicando las Leyes de la Termodinámica, con énfasis en el axioma de la entropía.

Como resultado de este estudio, se propone un funcional matemático que permite, desde las ciencias de la complejidad, determinar la verdadera sostenibilidad de un asentamiento humano, ciudad o zona metropolitana.