

METABOLISMO URBANO DEL AGUA POTABLE. APROXIMACIÓN AL CASO DE
CARTAGENA DE INDIAS

LUZ ANGÉLICA SAUMETH DE LAS SALAS

Economista

*ALEXANDER STWARD NIÑO SOTO

Doctorado en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad



UNIVERSIDAD DEL NORTE

ESCUELA DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

MAESTRÍA EN URBANISMO Y DESARROLLO TERRITORIAL

Barranquilla D. E. I. y P.

Diciembre 3 de 2016

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi amado Dios que bendice todas mis cotidianas tareas, me concede vida, esperanza, fortaleza y muchos sueños para alcanzar con sabiduría, determinación y paciencia. A mis padres, Iván de los Santos Saumeth y Luz Marina De las Salas, mi abuela Ana María Castellanos por su amor y dedicación, son un gran ejemplo y fuente de inspiración para mí. Mi esposo Aldo Javier Caro, gracias por tu respaldo, ánimo y tolerancia, especialmente, en los días de ausencia del hogar para dedicarme a estudiar e investigar. A mis hermanos, en especial, Iván Eduardo Saumeth por su apoyo incondicional en mis proyectos de vida.

Dedico este trabajo de grado a todos aquellos que a través de su respaldo y buen consejo me impulsaron en mis estudios de Maestría.

Resumen

La ciudad es un ecosistema artificial que tiene su propio metabolismo, entendido como la suma total de procesos socioeconómicos de consumo de recursos y generación de residuos que ocurren a través de la apropiación, transformación, circulación, secreción, emisiones y uso de los recursos propios y del entorno. El metabolismo urbano puede ser analizado en su conjunto o sobre un material específico, como el agua, por ejemplo. Al respecto, este trabajo de grado tiene como objetivo, caracterizar el metabolismo urbano del agua potable del sector residencial, analizando el caso Cartagena de Indias, Colombia. La metodología utilizada es la estimación econométrica (Identificación de variables, construcción de indicadores, correlaciones entre variables) de un modelo probabilístico de ecuaciones simultáneas en dos etapas (MCO2E) sobre consumo de agua del sector residencial y aguas servidas, utilizando fuentes oficiales de información estadística del año 2004 al 2014.

El caso de estudio aplicado muestra el funcionamiento de la metodología, evidenciando que el consumo como INPUT del metabolismo urbano del agua potable, en la ciudad de Cartagena, está afectado de forma directa por los ingresos de los hogares y en forma inversa e inelástica por la precipitación y la variación en las tarifas cobradas. Por su parte, las aguas residuales constituyen el OUTPUT del proceso metabólico urbano del agua potable; en Cartagena, están afectadas en forma directa, principalmente, por el consumo de agua del sector residencial, seguida del consumo en el sector comercio y la densidad poblacional urbana.

Tabla de contenidos

Introducción	7
Capítulo 1. <u>Del organismo al ecosistema</u>	12
1.1. El organismo vivo y su metabolismo	12
1.2. Ecosistema y sus dinámicas	15
1.2.1. Teoría general de sistemas	16
1.2.2. Componentes y funciones.....	18
1.2.3. Flujos de energía en el ecosistema según las Leyes de la Termodinámica	19
1.2.4. Tipos de ecosistemas y balance energético	20
<i>Comentarios finales</i>	28
Capítulo 2. <u>La ciudad como ecosistema</u>	30
2.1. Componentes y funciones	34
2.2. Metabolismo urbano.....	38
2.2.1. Metabolismo urbano del agua potable	41
2.2.2. Teorías económicas asociadas al metabolismo urbano del agua potable	43
2.3. Aproximación al método de medición	48
2.3.1. Método de estimación Mínimos Cuadrados en Dos Etapas (MCO2E)	50
2.3.2. Variables e indicadores.....	52
<i>Comentarios finales</i>	64
Capítulo 3. <u>Análisis de caso</u>	66
3.1. Caracterización de Cartagena de Indias, Capital de Bolívar	66
3.1.1. Componentes ambientales	67
3.1.2. Área urbana y rural	70
3.1.3. Condiciones económicas y sociales	74
3.1.3.4. <i>Pobreza</i>	80
3.1.3.5. <i>Educación</i>	82
3.1.3.6. <i>Salud</i>	83
3.1.3.7. <i>Servicios públicos domiciliarios</i>	83
<i>Energía eléctrica y gas</i>	83
<i>Sistema de acueducto</i>	84
<i>Ruta Metabólica del agua potable del sector doméstico</i>	85
3.2. Resultados del cálculo del modelo	93
Bibliografía	105

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de metabolismo según organismo y fuente de energía.....	14
Figura 2. Tipos de ecosistemas según balance energético	21
Figura 3. Modelo simplificado para los flujos de energía, Cartagena de Indias.....	25
Figura 4. Componentes generales del ecosistema urbano	35
Figura 5. Metabolismo urbano del agua potable residencial	43
Figura 6. Localización de Cartagena de Indias	68
Figura 7. Clasificación del suelo en Cartagena de Indias	72
Figura 8. Canal del Dique	85
Figura 9. Sistema de Conducción de Agua Cruda	87
Figura 10. Emisario submarino, Cartagena de Indias	92
Figura 11. Zona potencial para reservorios de agua lluvia	101
Figura 12. Tubos alternos de abastecimiento de agua cruda	102

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de funciones en las ciudades según diversos autores.....	37
Tabla 2. Cuerpos de agua de Cartagena de Indias	68
Tabla 3. Pobreza Multidimensional por componentes, Cartagena de Indias, 2014.....	81
Tabla 4. Características generales del Canal del Dique 1930, 1941, 1951, 1982.....	86
Tabla 5. Sistema de tratamiento –Aguas de Cartagena, 2012.....	89
Tabla 6. Estaciones de bombeo existente para distribución del agua	90
Tabla 7. Resultados de la estimación de la ecuación (1): Consumo de agua residencial	97
Tabla 8. Resultados de la estimación de la ecuación (2): Vertimientos	99

Introducción

La ciudad, desde la perspectiva del urbanismo tradicional, es entendida como una organización física, económica y social de asentamientos humanos que cuentan con elementos infraestructurales y prestan servicios *in situ*, tales como, educación, salud, trabajo, esparcimiento, entre otros. Sin embargo, en las últimas décadas se empieza a comprender la ciudad, siguiendo los principios de la ecología urbana, como un tipo de ecosistema artificial que está inmerso en otros; su funcionamiento, supervivencia y crecimiento requieren apropiarse e intercambiar de manera continua, energía, materia e información de otros ecosistemas, ya sean naturales o artificiales. Estos procesos se conocen como metabolismo urbano e implican absorción, transformación, circulación y utilización de recursos y generación de residuos.

Un recurso esencial en el metabolismo urbano es el agua, pues permite la supervivencia de todos los ecosistemas, ahora bien, según el Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) sobre los Recursos Hídricos en el Mundo (2006), la humanidad se enfrenta a una crisis de disponibilidad de agua que se profundiza por la aceleración del crecimiento urbano y la deficiente gestión del recurso. En efecto, llama la atención que la población mundial urbana pasó de 46% (2,8 billones) del total de habitantes en 2000 a 54% (3,9 billones) en 2015, esto es, un incremento de 39% que va de la mano con aumentos en el consumo de agua, producción interna bruta y generación de residuos: “El uso del agua ha estado creciendo mucho más rápido que la población durante al menos un siglo y esa tendencia continua. Durante los últimos trescientos años, la población se cuadruplicó, mientras que el uso del agua se multiplicó por siete” (PNUD, 2006, p. 137).¹

¹ De acuerdo al PNUD; “La población ha crecido en 1.600 millones en 1900 a 6.000 millones en 2000; mientras que, las extracciones de agua han aumentado, pasando de cerca de 500 kilómetros cúbicos en 1900 a cerca de 3.830 kilómetros cúbicos en 2000” (PNUD, 2006, p. 137).

En esta ecuación población-agua, el PNUD (2006) señala que “la mayoría de los países cuentan con suficientes recursos hídricos como para satisfacer las necesidades de los hogares, las industrias, el sector agrícola y el medio ambiente” (p.135), aun así, las proyecciones al año 2025 sobre la disponibilidad de agua per cápita, indican que más de 3.000 millones de personas podrían estar viviendo en países que sufren de estrés de agua, esto es, disponibilidad por debajo de 1.000 m³ por habitante; y 14 países pasarán de padecer estrés de agua a sufrir escases de agua² (PNUD, 2006) debido, principalmente, a los problemas en la gestión del recurso.

En este escenario, Colombia es considerado un país rico en recursos hídricos; sin embargo, de acuerdo al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2014) el 70% de esos recursos son aguas subterráneas; del 30% restante, el 77% se encuentra en la región del Amazonas, Orinoco y el Pacífico, lo que quiere decir que las regiones Andina y el Caribe, que albergan el 80% de la población del país, concentrada en un 71% en las ciudades, solo tiene acceso al 22% del agua superficial de Colombia.

Si bien, las ocho capitales de la región Caribe tienen acceso a fuentes de aguas superficiales o subterráneas, el sistema hídrico de tres de ellas (Cartagena de Indias, Barranquilla y Riohacha) tiene un “muy alto grado de fragilidad para mantener la oferta de abastecimiento de agua”: amenazas tales como periodos largos de estiaje o eventos como el fenómeno del niño podrían generar riesgo de desabastecimiento (IDEAM, 2014). Estas condiciones, acompañadas del crecimiento poblacional, generan mayores presiones de demanda al sistema hídrico para satisfacer las necesidades de los ecosistemas, el sector productivo y el sector

² La Escases de agua es menos 1.000 metros cúbicos por persona al año.

doméstico, teniendo en cuenta que este último sector en mención, concentra el mayor uso de agua en las ciudades.

En este orden de ideas, si se analiza la tasa de crecimiento poblacional y de consumo de agua potable de las tres ciudades de la región Caribe con alto grado de fragilidad para mantener la oferta de abastecimiento de agua según el IDEAM (2014), se encuentra que, en los últimos diez años las poblaciones de Barranquilla, Cartagena de Indias y Riohacha aumentaron (7%, 12% y 57%, respectivamente). No obstante, la capital del Atlántico redujo en 12% el consumo de agua del sector doméstico; Riohacha aumentó el consumo en 13%, pero, a un nivel inferior que el crecimiento poblacional registrado en ese periodo; mientras que, el consumo en Cartagena de Indias creció en 40%, al pasar de 25.943.620m³ en 2004 al 36.418.870m³ en 2014, esto es, cerca de 3,3 veces la tasa de crecimiento de la población de ese último año respecto al 2004. A esto se suma el hecho que en Cartagena persiste el déficit de abastecimiento domiciliario de agua potable y saneamiento básico.

En este contexto, es esencial acercarse a la comprensión de los procesos funcionales urbanos en materia de consumo del agua, su transformación y disposición final de materiales a fin de entender mejor los flujos de este recurso y su gestión (Pataki et al., 2006, citado por Zhang et al., 2015). Para ello, es de utilidad concebir la ciudad como un ecosistema urbano conformado por un conjunto de procesos continuos de entradas, transformación y salidas de materia, energía e información, más o menos similar al metabolismo de un ecosistema natural. La medición del metabolismo de una ciudad permite entender cómo su desarrollo causa impactos al entorno local y regional; además, brinda insumos para el diseño y planificación de las ciudades de modo que contribuyan al desarrollo sostenible (Conke y Ferreira, 2015).

En materia de medición, varios autores han estudiado los flujos de un sólo material o elemento del metabolismo urbano, como el agua, por ejemplo (Tambo, 2002; Zhang et al, 2010), a fin de analizar las relaciones entre este material y los componentes del sistema, su distribución y cambios en el tiempo para proporcionar elementos que permitan un mejor aprovechamiento del recurso en los diferentes sectores (medio ambiente, industria, agricultura, sector doméstico). Sin embargo, son escasos los estudios realizados sobre el metabolismo en ciudades de Colombia, en particular, el metabolismo urbano del agua en cualquiera de los sectores. Luego de realizar una exhaustiva investigación en las publicaciones y sitios web más reconocidos en el tema,³ se encontró que, el sistema metabólico del agua del sector doméstico en ciudades de Colombia aún no ha sido estudiado. Razón por la cual este estudio se dedica a caracterizar el metabolismo urbano de agua residencial y sus aguas servidas, caso Cartagena de Indias.

Para alcanzar el objetivo general, se propone: 1) Identificar las características generales del metabolismo en el organismo humano y los ecosistemas, 2) caracterizar la ciudad como ecosistema urbano, su metabolismo enfocado en el uso del agua, 3) Identificar los factores que afectan el consumo de agua residencial y sus aguas servidas en Cartagena de Indias, a través de una aproximación de los conceptos económicos al metabolismo urbano. El supuesto a demostrar es que el consumo como INPUT del metabolismo urbano del agua está afectado en forma directa, por los ingresos y, en forma inversa, por las tarifas cobradas y la precipitación, mientras que, las aguas residuales están afectadas en forma directa por el consumo del sector residencial, comercial e industrial. La metodología utilizada es la revisión documental y estimación econométrica (Identificación de variables, construcción de indicadores, correlaciones entre variables) de un modelo probabilístico de ecuaciones

³JSTOR, la base ELSEWIER, Scopus, Science Direct.

simultáneas sobre consumo de agua del sector residencial y aguas servidas, utilizando fuentes oficiales de información estadística del año 2004 al 2014.

El presente documento se divide en tres capítulos. El primero trata sobre los aspectos generales de organismo humano, el ecosistema y su metabolismo, entendido a partir de la teoría general de sistemas y las Leyes de la Termodinámica que permite clasificar los ecosistemas según su balance energético. El segundo, describe el concepto de ciudad como ecosistema urbano, componentes y su metabolismo bajo una aproximación a la teoría económica. Finalmente, en el tercer capítulo se hace uso de la metodología de mínimos cuadrados en dos etapas para identificar los factores que afectan el consumo de agua del sector residencial y sus aguas servidas en Cartagena de Indias.

Capítulo 1.

Del organismo al ecosistema

La ecología urbana permite pensar a la ciudad en función a sus múltiples sistemas y recursos utilizados para la captación y el flujo de energía que determina sus dinámicas, tanto internas como externas. En este sentido, la ciudad es un ecosistema artificial con un metabolismo determinado cuyo recurso principal es el agua. Para logra estudiar este tipo de ecosistema es necesario revisar las teorías generales que definen qué y cuáles son las características de los organismos, así como los ecosistemas y sus funciones metabólicas. Por ello, el presente capítulo analizará estos temas desde la Teoría General de Sistemas y las Leyes de la Termodinámica, claves para entender a la ciudad como un entramado de sistemas que se complementan entre sí.

1.1. El organismo vivo y su metabolismo

El organismo humano es un ente social formado por 100 billones de células diversas organizadas en tejidos, órganos, sistemas que, de manera articulada e interdependiente, ayudan a mantener las condiciones de autorregulación del medio interno con el fin de garantizar la vida y adecuado funcionamiento (Guyton y Hall, 2011). Todos los organismos, independientemente de lo complejos que sean, tienen las mismas funciones biológicas vitales: Circulación, respiración, nutrición, captura y respuesta a estímulos, transporte, regulación y eliminación de sustancias, reproducción, intercambio constante de energía que obtiene del medio externo.

Las unidades elementales básicas de los organismos vivos son las células y tienen funciones similares en todos los sistemas que constituyen: a) Liberan energía necesaria para mantener las funciones de los órganos⁴, b) Se reproducen formando más células, c) Liberan productos finales de sus reacciones químicas que reutilizan (Garrido y Teijón, 2006). Para llevar a cabo éstas funciones las células adquieren y aprovechan elementos del entorno (energía y materia) realizando procesos al interior que permiten mantener la vida del organismo y su correcto funcionamiento; este conjunto de procesos se conocen como Metabolismo.

Metabolismo en los organismos

El metabolismo es el “conjunto de reacciones bioquímicas común en todos los seres vivos para la obtención e intercambio de materia y energía con el medio ambiente y, la síntesis de macromoléculas” (Grijalva, 2010, p.159, citado en Cárdenas y Ojea, 2014, p.97). En los organismos, el metabolismo se produce en las células. De acuerdo a Cárdenas y Ojea (2014) el metabolismo se caracteriza por ser un proceso constante que va desde la **absorción** de nutrientes, su **degradación** para obtener energía, **asimilación** de ésta, **síntesis** de nuevos componentes, **transporte** de nutrientes y sustancias y, **liberación de productos de desecho** que son reutilizados por la célula, convirtiendo al metabolismo en un proceso cíclico.

La importancia del metabolismo radica en dos funciones esenciales: suministrar energía y producir los materiales de partida para la formación de moléculas que cumplen tareas imprescindibles en los organismos vivos⁵ (Peretó, Sendrá, Pamblanco, y Bañó, 2007). Estas funciones se llevan a cabo a través de diferentes tipos de metabolismo según el organismo, si es autótrofo o heterótrofo, así como la fuente de obtención de energía, tal y como se muestra

⁴La liberación de energía se realiza a través de reacciones del oxígeno con diferentes compuestos (Hidratos de carbono, grasas y proteínas).

⁵A este proceso también se le conoce como biosíntesis.

en la siguiente figura, cuya diferencia en el tipo de metabolismo radica en la fuente de obtención de energía (oxidación de compuestos orgánicos para el caso de los organismo heterótrofos y oxidación de compuestos inorgánicos en los autótrofos).

Figura 1. Tipos de metabolismo según organismo y fuente de energía



Fuente: Elaboración propia a partir de Peretó, Sendrá, Pamblanco, y Bañó (2007, p.229).

Los organismos autótrofos presentan dos tipos de metabolismo que tienen en común el hecho de obtener energía a partir de compuestos inorgánicos del entorno (agua, luz, dióxido de carbono); en contraste, el metabolismo heterótrofo adquiere energía a partir de la oxidación de compuestos orgánicos (proteínas, carbohidratos, lípidos, aminoácidos, azúcares) y la luz. (Figura 1).

Estos procesos metabólicos se realizan en dos fases: una es el **anabolismo**, referida al “conjunto de reacciones para formar diversas biomoléculas” (Peretó, et al., 2007, p.229) o elementos constituyentes de los seres vivos, y el **catabolismo**, definido como la transformación de moléculas complejas en unas de menor complejidad para obtener energía. Cada una de esas fases se realizan “manteniendo un equilibrio dinámico, autorregulándose” (Garrido y Teijón, 2006, p.13); de modo que, “si en el proceso ocurre alguna perturbación,

automáticamente el organismo pone en marcha mecanismos para restaurar el equilibrio interno. También, de manera permanente, existen mecanismos de control para evitar que colapsen los flujos de materia y energía” (Peretó, et al., 2007, p.231). Estos fenómenos de autorregulación se conocen como **Homeostasis** y se caracterizan por su “alta capacidad de respuesta y adaptación a los cambios del entorno o a las necesidades celulares” (Op.cit, p. 231).

Las regulaciones homeostáticas se distinguen por su simplicidad debido “al uso recurrente de un número limitado de mecanismos o factores cooperativos con capacidad de entrar en acción de manera simultánea o sucesiva” (Aréchiga, 2000, Peretó, et al., 2007), haciendo del metabolismo en los organismos, un proceso cíclico y estable. La estabilidad y regulación del metabolismo en los organismos también depende del ecosistema o red de relaciones al que hace parte y en las cuales capta y transforma energía, materia e información, considerando además, que la mayor parte de los atributos del organismo se encuentran en las relaciones con el ecosistema del que hace parte. Si se desea tener una mejor comprensión del metabolismo como concepto analógico para aproximarnos al análisis de ciudad, no basta con considerar el metabolismo en los organismos, es necesario acercarse a la comprensión del ecosistema, sus dinámicas y metabolismo.

1.2. Ecosistema y sus dinámicas

Ahora bien, en la siguiente escala relacional se presentan los ecosistemas cuyas características especiales se configuran a partir de la articulación funcional de múltiples organismos (Biocenosis) en medio de su ambiente abiótico próximo (Biotopo), en un tiempo y espacio determinado (Margalef, 1986; Shmithusen, 1976, citado por Terradas, 2014). En

una forma más específica, el biólogo Eugene Odum, lo define como “sistema que incluye la totalidad de los organismos (comunidad) de un área determinada que actúan en reciprocidad con el medio físico de modo que una corriente de energía conduzca a una estructura trófica⁶, diversidad biótica y ciclos de materiales” (Escolástico, 2000, p.85).

Como resultado, los ecosistemas mantienen la vida de los organismos que lo conforman mediante el intercambio continuo de materia, energía e información entre todos sus componentes y, de ellos con el ambiente exterior. Estos procesos se pueden comprender a la luz de la teoría general de sistemas.

1.2.1. Teoría general de sistemas

El biólogo Ludwig Van Bertalanffy (1930) define el sistema “como conjuntos de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, además, mantienen al sistema directa o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo” (Arnold y Osorio, 1998, p.3). De acuerdo a estos autores, la interconexión entre los elementos del sistema permite que se comporte como un todo unitario y no un agregado de partes, lo que genera nuevas propiedades (emergentes) que no estaban inicialmente en sus elementos. En el caso de los ecosistemas, se pueden identificar varios ejemplos de propiedades emergentes: sucesión, diversidad, productividad, estructura trófica, ciclos bioquímicos, entre otros (Camargo, 2008).

“Las definiciones y principios de la teoría de sistemas valen para cualquier sistema y éstos pueden ser tanto físicos, como biológicos, sociales, culturales o conceptuales” (Quintanilla,

⁶ Los niveles donde las poblaciones tienen forma de incorporar materia y energía (Malacalza, 2000, p.30).

1976, citado por Castaldo, 2012, p.86). En general, se clasifican de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) **Origen:** *Naturales*, estos son “los creados por la naturaleza como respuesta a fenómenos físicos, químicos, biológicos o artificiales” (Castaldo, 2012, p.94) y, *transformados*, referidos aquellos intervenidos por el hombre.
- b) **Ambiente o grado de aislamiento:** *Abiertos* o *cerrados*, de acuerdo a si existe o no intercambio entre los componentes del sistema y el ambiente exterior.
- c) Con relación a su **estabilidad o dinamismo en el tiempo:** *Estático*, sino sufre cambios con el tiempo y, *dinámicos* en los casos en que se modifican con el tiempo.
- d) **Entitividad:** *Reales, ideales o modelos*. Los primeros se refieren a una existencia independiente del observador que los puede descubrir, los segundos son construcciones simbólicas, y el tercer tipo corresponde a abstracciones de la realidad, en las que se combina lo conceptual con las características de los objetos (Arnold y Osorio, 1998).

Si consideramos los anteriores criterios, se puede afirmar que el *ecosistema* es un *sistema dinámico* que cambia con el tiempo y que depende del ambiente exterior para las entradas y salidas de energía y materia que requiere su estructura y su funcionamiento, característica que lo constituye en un *sistema abierto*. Según su origen, existen *ecosistemas naturales* como los páramos, por ejemplo, y aquellos intervenidos por el hombre, conocidos como *ecosistemas artificiales*.

Para acercarse a la comprensión de las dinámicas de un ecosistema, cualquiera sea su clasificación, se requiere analizar su estructura (componentes) y rasgos funcionales. Lo

primero son los atributos derivados de las relaciones entre sus componentes (naturaleza de los elementos, cantidad y dimensiones, distribución espacial, agrupación). Lo segundo, se refiere a las características morfológicas, fisiológicas o fenológicas del sistema (intercambios, movimientos, secuencias y tendencias, de acuerdo a Camargo (2008). Cada uno de estos aspectos está relacionado con el flujo de energía y ciclos de materia (agua, sustancias orgánicas y otras sustancias inorgánicas) requeridos por el ecosistema para que cada uno de sus componentes realice sus funciones.

1.2.2. Componentes y funciones

Los componentes de un ecosistema pueden dividirse en bióticos y abióticos. El componente biótico es la comunidad de especies que se clasifican funcionalmente en productores (plantas), consumidores y descomponedores. Por su parte, el componente abiótico es el medio físico carente de vida que almacena los nutrientes orgánicos e inorgánicos (Chair, Chapin, Constanza, Ehrlich, Golley, et al, 1999). Cada componente sea biótico o abiótico, tiene un funcionamiento similar, todos necesitan de una fuente de energía que permita el movimiento continuo de materiales hacia dentro y fuera del sistema. Tanto la energía como la materia, no se crea, ni se destruye, solo se transforman, se combina indefinidamente y son reutilizados por nuevos organismos (Fontana, 2015; Higuera, 2009). En medio de estos procesos, los ecosistemas, al igual que los organismos que lo conforman, son capaces autorregularse para mantener el equilibrio.

Si la situación de equilibrio del ecosistema es alterada por un factor ambiental o biológico, se pone en marcha mecanismos de regulación (realimentación) de forma que “el sistema tiende a corregir esa desviación y volver a la posición original, aunque las desviaciones sólo pueden

ser corregidas dentro de unos límites” (Escolástico, 2000, p.84). Estos procesos **Homeostáticos** o de autorregulación, permiten mantener la comunidad biológica y el medio ambiente físico dentro de ciertos límites funcionales, siempre y cuando el ecosistema no sea alterado de una manera significativa por una perturbación externa severa (Marten, 2001).

1.2.3. Flujos de energía en el ecosistema según las Leyes de la Termodinámica

Si se analiza el ecosistema a luz de las Leyes de la Termodinámica, se encuentra que la Ley 0 (cero), conocida como Ley del equilibrio térmico,⁷ describe cómo los componentes bióticos y abióticos del ecosistema se van conectando entre sí para drenar la energía acumulada de uno hacia otro de menor concentración:

“Siempre que se presenten acumulaciones de energía, se desarrollarán espontáneamente circuitos para captarla y transformarla. Tales estructuras materiales que brindan curso al correr de la energía, son las llamadas **estructura disipativas** [...] En la medida que la oferta ambiental del ecosistema en términos de energía disponible en forma de calor, radiación, flujos de agua y nutrientes minerales, sea amplia, diversa y constante, más **circuitos disipativos** pueden asociarse a él y son capaces de drenar la acumulación de energía” (Camargo, 2008, p.51).

Tanto la producción primaria en los ecosistemas como la acumulación de energía en ellos, es diferente, en algunos es abundante y puede ser parcialmente exportada a otros ecosistemas menos productivos o “subsidiados” a través de las **estructuras disipativas**. En el caso de los ecosistemas con escasa producción primaria, “predominan las funciones de consumo o

⁷ El equilibrio térmico es el estado en el cual los sistemas equilibrados tienen la misma temperatura.

descomposición de lo producido por otros ecosistemas que son explotados” (Camargo, 2008, p.53).

La Primera Ley de la Termodinámica sustenta que la energía captada por los ecosistemas, no se crea, ni se destruye, solo se transforma, de modo que, la energía que entra al ecosistema, sale, y lo que no sale se convierte en crecimiento y reproducción que aumenta la capacidad del sistema para captar y retener más energía. Por su parte, la Segunda Ley de la Termodinámica señala que “todos los procesos reales son irreversibles, generan un aumento de la *entropía* y causan una degradación de la energía” (Passamai, 2009, p.50). En este sentido, “la energía no solo fluye de un compartimento con mayor energía hacia el de menor contenido, sino que por el camino se *disipa* una buena porción, generalmente en forma de calor” (Camargo, 2008, p.70). Es importante tener en cuenta que, a medida que los ecosistemas aumentan su tamaño y complejidad desarrollan estructuras disipativas especializadas con la capacidad de captar los recursos y manejarlos de manera más eficiente para reducir las pérdidas de energía.

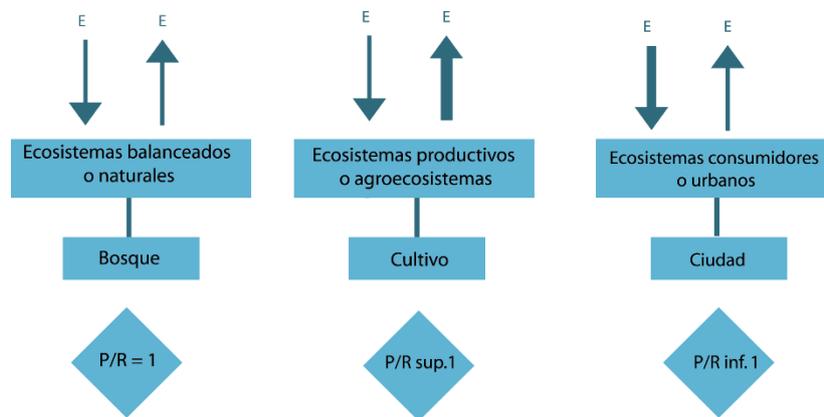
De acuerdo con diversos autores, “estas Leyes dan las bases para la cuantificación de las interacciones entre los ecosistemas y sus alrededores (Weston y Ruth, 1997) y son ampliamente reconocidas como una aproximación fundamental para la modelación de cualquier sistema” (Liao, Heijungs y Huppes, 2015, citado por Silva y Díaz 2015, p.151).

1.2.4. Tipos de ecosistemas y balance energético

Existen múltiples clasificaciones del ecosistema según criterios de origen, ubicación o tamaño. De acuerdo al origen, relacionado con el balance energético, los ecosistemas pueden

ser: balanceados, productores o consumidores. La diferencia radica en la cantidad de energía (P) que entra al ecosistema respecto a la energía perdida en forma de calor (R), así, en los ecosistemas balanceados lo que entra en términos de energía es igual a los que sale ($P/R=1$); mientras que, los ecosistemas consumidores o urbanos, requieren cantidades energía considerablemente superior a la que sale del ecosistema ($P/R < 1$) (Fontana, 2015). (Figura 2).

Figura 2. Tipos de ecosistemas según balance energético



Fuente: Fontana, 2015, p. 138.

Nota: Las flechas gruesas indican el sentido predominante de la energía

Ecosistemas balanceados o naturales

Los ecosistemas balanceados o naturales son aquellos no intervenidos por el hombre. Se caracterizan por auto-organizarse, ser estables en el tiempo y autosuficientes, de hecho, sobreviven únicamente de insumos naturales, como la luz solar y el agua por ejemplo. La mayoría de los insumos y salidas de los ecosistemas naturales provienen de intercambios con ecosistemas cercanos, “cuando el viento, el agua, la gravedad o los animales, transportan materiales que también contienen energía e información” (Marten, 2001).

La principal fuente de energía de estos ecosistemas es el sol (primaria e inagotable), cuyos flujos son captados por productores primarios (fotosintetizadores o autótrofos) que convierten la energía calórica en química. Los fotosintetizadores también cuentan con la energía que concentran como resultado de la acumulación de agua y nutrientes. La energía acumulada es aprovechada por los consumidores primarios (herbívoros), luego pasa a los consumidores secundarios (carnívoros) y terciarios (omnívoros). Los restos y desechos de productores y consumidores son acumulados en algún sustrato, principalmente, el suelo en los ecosistemas terrestres y el sedimento en los acuáticos; luego, son descompuestos por organismos (vía detrítica), liberando nutrientes que incrementan las potenciales entradas de energía a los productores. Esto permite que el proceso sea un ciclo estable en el cual los residuos de un proceso sirven de insumos a otros, todo se aprovecha, de modo que el ecosistema natural no genera, ni existe el concepto de basura.

En general, el flujo de energía en los ecosistemas naturales es unidireccional y “en cada pasaje de uno a otro organismo se producen pérdidas en forma de calor” (Fontana, 2015, p.137) sin agotar el flujo de energía. En términos matemáticos, si P es la energía que entra al ecosistema natural proveniente del sol y R la energía perdida en forma de calor, la relación P/R es 1; es decir, está en equilibrio pues lo que entra en términos de energía es igual a lo que sale (Fontana, 2015).

Ecosistemas productores o agroecosistemas

“Son ecosistemas naturales transformados para colocación de cultivos, silvicultura o especies forestales. Se caracterizan por estar simplificados al máximo, con unas pocas especies” (Fontana, 2015, p.139) y su composición es muy diferente en comparación con el sistema

natural reemplazado (Chair et. al., 1999). Además de las plantas y animales, los agroecosistemas contienen elementos antropogénicos como los canales de riego, equipos de labranza, fertilizantes, entre otros (Marten, 2001) que permiten mantener su funcionamiento, por ello, a diferencia de los ecosistemas naturales, no son autosuficientes.

Es importante tener en cuenta que los agroecosistemas es un sistema intervenido por el hombre, por lo tanto, son un tipo de ecosistema artificial que sirve como “compartimento autótrofo que exporta sus excedentes de energía química a los centros de consumo” (Camargo, 2008, p.266). Por esta razón, de la clasificación propuesta por Fontana (2015), en este trabajo se considera solo dos tipos de ecosistemas según balance energético: ecosistema natural y ecosistema artificial o urbano.

Ecosistemas urbanos (consumidores)

Los ecosistemas urbanos “son comunidades biológicas donde los humanos representan la especie dominante o clave y donde el medioambiente edificado constituye el elemento que controla la estructura física del ecosistema” (PNUD, PNUMA, Banco Mundial, 2000, citado por Leal, 2008, p.5). Así como los ecosistemas naturales, su funcionamiento depende de los intercambios de energía, materia e información; sin embargo, no cumplen dos características esenciales de un ecosistema natural: su principal fuente de energía no es primaria e inagotable (el sol), sino secundaria a partir de la explotación de materiales no renovables (petróleo, gas); además, los intercambios de materia entre los organismos y su medio natural y artificial no son cíclicos, sino horizontales o lineales, lo que implica la explotación de ecosistemas alejados para obtener recursos como agua, combustibles, alimentos y trasladar residuos o excedentes.

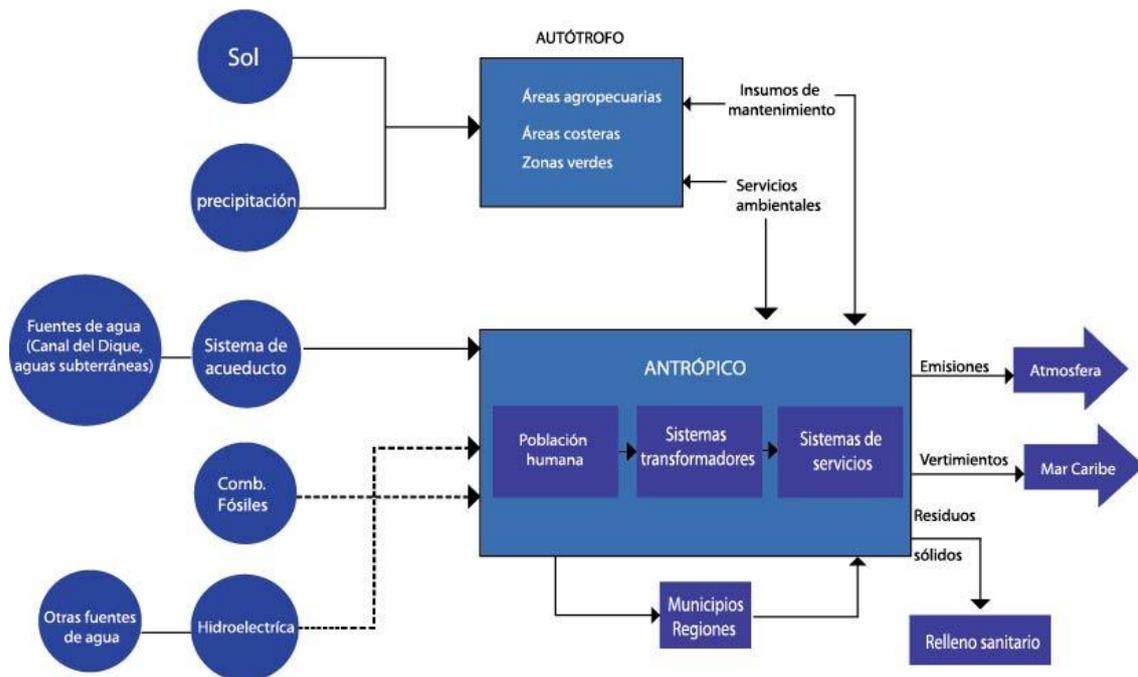
En efecto, el ecosistema urbano no es autosuficiente: “se alimenta de los productos que provienen de los ecosistemas naturales y de los agroecosistemas (granos, fibras, ganado) en forma de energía química (leña, madera, minerales, etc.) y sale del mismo energía transformada en productos industriales y desechos” (Fontana, 2015, p.139). En otras palabras, estos ecosistemas son subsidiados o explotadores y se caracterizan por tener una escasa producción primaria en comparación con un ecosistema natural (Fontana, 2015), por ello, predominan funciones de consumo o descomposición de lo producido por otros ecosistemas.

En el marco de la Ley 0 (cero) de la Termodinámica, “los ecosistemas urbanos o ciudades son las mayores estructuras disipativas de la biosfera [...] invierten gran cantidad de trabajo en hacer fluir toda clase de recursos hacia sus propios centros de transformación” (Camargo, 2008, p.57). Para conectarse a los flujos de energía disponibles en el entorno, los ecosistemas urbanos “ocupan el mayor espacio posible en el menor tiempo y capturan una gama amplia de flujos en condiciones ambientales diversas; o bien, pueden especializarse en la captación de un segmento de la oferta ambiental disponible” (Camargo, 2008, p.57), lo cual dependerá tanto de la amplitud como de la diversidad de la oferta de flujos de energía disponible en el ecosistema y su entorno.

En este sentido, el ecosistema urbano es un “encadenamiento de estructuras disipativas en las que la materia se organiza por impulso de la energía [...] a mayor amplitud, constancia y diversidad en los flujos de energía disponible, los circuitos que participan en su disipación logran mayor masa, diversidad y se interconectan de un modo más complejo” (Camargo, 2008, p.56). La siguiente figura, adaptado de Camargo (2008), muestra un ejemplo de modelo simplificado de flujos de energía en el componente autótrofo (áreas agropecuarias, costeras, zonas verdes, etc.) y antrópico (población, sistemas transformadores y de servicios) de

Cartagena de Indias a través de estructuras disipativas tales como la hidroeléctrica y el acueducto. Como resultado de este conjunto de procesos se obtienen los bienes y servicios que requiere el funcionamiento de la ciudad, al tiempo que se generan emisiones a la atmósfera, vertimientos al Mar Caribe y residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios.

Figura 3. Modelo simplificado para los flujos de energía, Cartagena de Indias



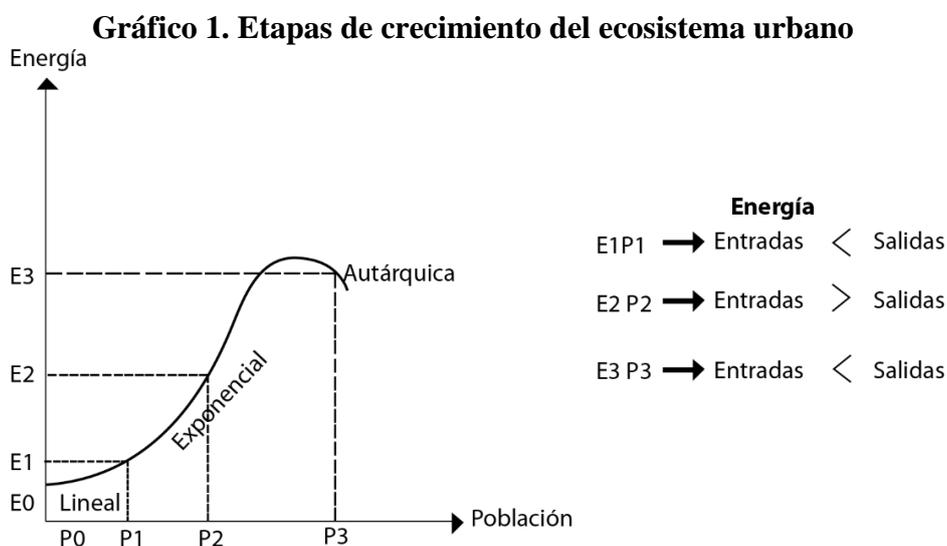
Fuente: Adaptado de Camargo (2008).

Ahora bien, de acuerdo a la Primera Ley de la Termodinámica, el nivel de energía y materia que logra contener un ecosistema urbano, es el balance de sus entradas y salidas. “Cuando las primeras superan a las segundas, el sistema crece y se reproduce. Cuando las segundas son mayores, el sistema se deteriora” (Camargo, 2008, p.62). En este sentido ¿qué se puede inferir sobre el crecimiento del ecosistema urbano? Teniendo en cuenta el balance de entradas y salidas de energía en el ecosistema urbano, Camargo (2008) establece tres etapas: 1) Crecimiento lineal, 2) Transición; y, 3) Crecimiento asintótico:

1. Etapa de crecimiento lineal: Es la etapa inicial de un ecosistema, se caracteriza por su poca complejidad, tamaño y capacidad para impulsar su propio desarrollo; está fuertemente determinado por su entorno (disponibilidad de recursos, externalidades) y es limitada la velocidad y eficiencia de los flujos de energía y materia en el ecosistema. En esta etapa, las entradas de energía no superan las salidas.

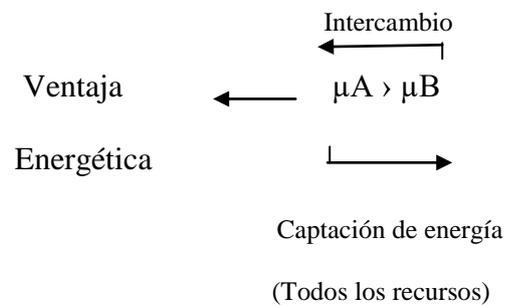
2. Etapa de transición (crecimiento exponencial): En el sistema se acelera el flujo de información, bienes, servicios y personas, lo que se refleja en: a) fuertes presiones de cambio en la estructura socioeconómica, b) acelerado reemplazo de usos y actividades sobre el espacio, c) transformaciones de los equipamientos, d) mayor atracción de personas que residen en los asentamientos vecinos, quienes tienen más motivos para acudir al centro urbano emergente.

3. Etapa de crecimiento asintótico (autárquica): El crecimiento del sistema va incrementando los costos energéticos de sostenimiento, limitando el crecimiento. Más allá de estos límites, el sistema pierde eficiencia y rentabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Camargo señala, además, que en cada una de estas fases de crecimiento, el ecosistema transforma la energía captada en estructuras que permiten captar más energía, con lo que la interacción con otros sistemas se da a través del intercambio o la competencia. De acuerdo al autor, si μ es la capacidad de captación de energía, A es el sistema 1, y B es el sistema 2; entonces, en los casos que $\mu_A > \mu_B$, los recursos energéticos fluirán más hacia A que hacia B , ganando A ventaja energética que propiciará la creación de nuevas estructuras de captación de energía. Las diferencias de captación entre A y B generan ventajas competitivas en A que tienden a aumentar, conduciendo a la represión del sistema de menor captación (B).



La energía que fluye entre A y B como al interior de cada sistema, no logra ser transformada totalmente en otra forma de energía concentrada; es decir, una parte de *disipa*, por lo general, en forma de calor, siendo esta pérdida de energía superior a la que efectivamente entra y utiliza el sistema (Fontana, 2015). Al respecto, el ecosistema urbano mantiene el flujo de energía que requiere su estructura y funcionamiento, aumentando su tasa de acumulación de energía (crecimiento y reproducción) a través de la captación voraz de energía o mediante la transformación de ésta con eficiencia (Camargo, 2008). Por lo general, en los ecosistemas urbanos se da la primera situación en mención.

Estos procesos de transformación de energía y materia pueden organizarse en ciclos para destruir, absorber y disipar lo captado (catabolismo); de igual forma, utilizar la materia y

energía para crear sus propios materiales (anabolismo).n“Los flujos de energía y materiales en el sistema, su uso y transformación en él, así como los flujos de salida, se conoce como **Metabolismo**” (Terradas, Franquesa, Parés y Chaparro, 2011, p.58). Si se concibe la ciudad como un ecosistema artificial con elementos interdependientes que toman del entorno materia y energía para mantener su estructura y funciones, entonces, es necesario realizar una aproximación conceptual de su metabolismo desde el enfoque de la ecología urbana para lograr entender sus dinámicas.

Comentarios finales

Lo estudiado en este capítulo, muestra que tanto los organismos vivos como los ecosistemas, indistintamente de su complejidad, tienen funciones vitales que se mantienen a través del intercambio continuo de energía, materia e información con el medio que les rodea. Esto se conoce como metabolismo y se caracteriza por ser un conjunto de procesos constantes que van desde la absorción, transformación, circulación y liberación de productos de desecho.

Desde la Teoría de sistemas y las Leyes de la termodinámica, se deducen varias características del metabolismo en los organismos y ecosistemas. En primer lugar, la Teoría de sistemas señala que sus componentes están estrechamente relacionados entre sí, además, pueden presentar acumulaciones de energía que permiten desarrollar circuitos (estructuras disipativas) para *captar* más energía, transformarla y pasarla de un componente a otro (Ley 0). Esta energía captada no se crea, ni se destruye, solo se *transforma*, de modo que, la energía que entra al organismo o ecosistema, sale, y lo que no sale, se convierte en crecimiento y reproducción, aumentando la capacidad del sistema para captar y retener más

energía (Ley 1). En todos estos procesos se genera un aumento de la entropía, esto es, *degradación de la energía que se disipa en forma de calor.*

En el caso de los ecosistemas, según el balance de las entradas y salidas de energía, éstos se clasifican en balanceados (naturales) o consumidores (urbanos). La diferencia entre ellos radica en que: 1) La principal fuente de energía de los ecosistemas urbanos no es primaria e inagotable (el sol), sino secundaria a partir de la explotación de materiales no renovables (petróleo, gas); 2) Los intercambios de materia entre los organismos y su medio natural y artificial no son cíclicos, sino horizontales o lineales, lo que implica la explotación de ecosistemas alejados para obtener recursos como agua, combustibles, alimentos y trasladar residuos o excedentes; 3) El ecosistema urbano no es autosuficiente, es subsidiario o explotador, por tanto, predominan funciones de consumo o descomposición de lo producido por otros ecosistemas.

Capítulo 2

La ciudad como ecosistema

En el capítulo uno se realizó una aproximación al concepto de ciudad como ecosistema urbano que intercambia energía y materia para mantener sus procesos funcionales. Con todo, existen múltiples conceptos que varían según la disciplina (sociología, filosofía, economía, etc.) la época y el contexto en que surgen. En su utilización se conserva habitualmente el sentido etimológico latino, donde ciudad es derivado del latín “*Civitas*” definiéndola en su sentido más general como: “conjunto de ciudadanos, de hombres con derechos plenos y principios propios” (Castro, P. et al., 2003) y del latín “*urbs*” para referirse a la ciudad como estructura física (Ramírez, 1998). También, se han utilizado criterios enfocados en el tamaño, la densidad poblacional, las actividades no agrícolas que lo diferencian de lo rural, así como los modos de vida de los habitantes.

En la actualidad, en el sentido más simple, general y tradicional, la denominación ciudad se usa para referirse a los “asentamientos humanos de un tamaño poblacional dado que cuentan con elementos infraestructurales (redes de distribución y recolección) y servicios prestados *in situ* (educación, salud, esparcimiento, trabajo, etc.) que se distinguen de otros asentamientos más pequeños tales como pueblo, caserío, vereda, corregimiento, etc.” (Boisier, 2006, p.7).

Considerando la progresiva industrialización, sobre todo tercerización de los sistemas económicos a nivel global (Valicelli y Pesci, 2000, p.54), las interpretaciones de ciudad de mediados del siglo XX y el XXI, responden principalmente a las dinámicas del crecimiento económico, globalización de las relaciones entre los individuos y los territorios y, el desarrollo científico y tecnológico. Muestra de ello, son conceptos como “Ciudad Mundial”,

esto es, según el urbanista Peter Hall (1966), las “grandes ciudades en las cuales una parte desproporcionada de los negocios más importantes se realizan en ellas” (Bosier, 2006, p.8), o el concepto de “Ciudad Global”, definida por Saskia Sassen (1991) como una red de ciudades líderes que conforman un sistema en sí mismo, caracterizado por la alta concentración de servicios a la producción y una fuerte orientación hacia el mercado global, y otras ciudades (Cuervo, 2003). Entretanto, diversos autores introducen la noción de “Ciudad inteligente” como aquellas que “utilizan estratégicamente las nuevas TIC para integrar sus subsistemas críticos de agua, energía, seguridad, movilidad, salud, educación, comercio y medio ambiente, promoviendo a su vez el desarrollo sostenible y la innovación” (Universidad Externado de Colombia, 2012, p.25).

Si bien, este tipo de enfoques conceptuales cuentan con elementos clave de los procesos de la ciudad (en lo socioeconómico, político o tecnologías aplicadas al desarrollo), no llevan a una mejor comprensión de los complejos fenómenos funcionales de la ciudad en su interacción con el medio físico, necesaria para mantener la estabilidad en un contexto de evidente aceleración del crecimiento urbano. En efecto, según cifras de la ONU y el Banco Mundial, la población mundial urbana pasó de 46% del total de habitantes (2,8 billones) en 2000 a 54% (3,9 billones) en 2015, esto es, un incremento de 39%, acompañado del incremento en el consumo de recursos, producción interna bruta y generación de residuos.

En este panorama, cada vez toma más fuerza concebir las ciudades y analizarlas bajo enfoques conceptuales como el de Robert Edra Park (1967), sociólogo investigador de la

Universidad de Chicago, precursor de la teoría de Ecología Urbana,⁸ quien define la ciudad como:

[...] “algo más que una combinación de hombres individuales y conveniencias sociales -calles, edificios, farolas, tranvías, teléfonos, etcétera-; algo más, también, que una mera constelación de dispositivos administrativos e instituciones -tribunales, hospitales, escuelas, policía y funcionarios civiles de distinto tipo-. La ciudad es, más bien, un cuerpo de costumbres y tradiciones, y de actitudes y sentimientos organizados que son inherentes a dichas costumbres y que se transmiten por medio de dicha tradición” (Park, en Park y Burges 1967: 1, citado por Mongue, 2007, p.19).

En otras palabras, la ciudad no es un sólo un mecanismo físico o una construcción artificial, es un producto de la naturaleza humana y está involucrada en el proceso vital de la gente que la conforma, construye y se desarrolla a través de una “tupida red de interacciones especializadas, heterogéneas” (De la Peña, 2015, p.25).

Desde la perspectiva de la ecología urbana, se concibe como un tipo de ecosistema artificial que debe ser analizado como cualquier otro tipo de ecosistema. Al respecto, la iniciativa internacional “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2012)”, señala que, “las ciudades son ecosistemas heterotróficos: sistemas abiertos y dinámicos que consumen, transforman y liberan materiales y energía; se desarrollan y se adaptan; están determinados por los seres humanos e interactúan con otros ecosistemas” (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente -MAAM, 2012, p.146). Tiene además, “una organización autopoietica y

8 “Según Grimm et al. (2008), la ecología urbana es una ciencia que integra las teorías y metodologías de las ciencias naturales y sociales para investigar estándares y procesos de los sistemas ecológicos urbanos. Dow (2000) la define como una de las más concurridas intersecciones investigativas entre procesos biofísicos y sociales” (Angeoletto, Essy, Ruiz, Fonseca, Massulo, et al, 2013, p.11).

disipativa” (Izquierdo, 2005, p. 232), lo que implica pensar la ciudad no solo en términos de su dinámica socio-económica, sino también en lo referente a su interacción con el entorno.

Esta interpretación, en el marco de la teoría de autopoiesis del biólogo Humberto Maturana (1996), pretende entender la ciudad como un ecosistema artificial “cuyos elementos constitutivos forman redes de reacciones (interacciones) que continúan produciendo los elementos de los que está integrado y especifican sus propios límites. Se caracteriza por ser distinto al medio circundante a través de su propia dinámica, de manera que ambas cosas son inseparables” (Rodríguez y Torres, 2003, p.113); esto es, tanto los elementos constitutivos del ecosistema urbano como del medio que la circunda.

Como se ha descrito anteriormente, desde el punto de vista de la Termodinámica la ciudad es un conjunto de estructuras disipativas (Izquierdo, 2005), que adicionalmente presentan características de complejidad (no lineales, auto-organización) como sistemas alejados del equilibrio, los cuales para mantenerse necesitan “compensar esta disipación con un aporte continuo e importante de energía y materia desde el exterior” (García y Fairen, 1980, p.9) que “dispersan en forma no aprovechable” (calor, gases, etc.) (Centre de Política de Sol i Valoracions, 2002, p.8). Lo anterior implica relaciones de dominación entre el hombre y el medio externo para que la ciudad, como estructura disipativa, logre mantenerse en medio de los desequilibrios que presenta.

Los desequilibrios entre la ciudad y el medio ambiente que la constituye o circunda, están relacionados con que la ciudad es un gran consumidor o receptor de energía y agua, tiene múltiples flujos con su entorno (migración, trabajo temporal, actividades productivas, etc.) y

su vez, no es un generador de servicios ecosistémicos. Algunos desequilibrios pueden reflejarse en la relación entre el sistema económico y el medio ambiente:

a) Utilización excesiva por el acceso libre a los componentes del medio externo de carácter público, b) externalidades negativas que agentes económicos pueden transferir a otras actividades, sin asumir el verdadero costo, c) información imperfecta o errónea⁹, d) los efectos nocivos de una acción están demasiado alejados en el tiempo para que el agente económico sea propenso a tomarlos en cuenta de inmediato, e) las preferencias de los agentes económicos son tales que la importancia que se le da al medio ambiente es insuficiente (Polése, 1998, p. 128).

La ciudad como ecosistema “esta anidada dentro de ecosistemas más amplios, hasta llegar a la escala de biosfera, por lo tanto sus sostenibilidad está en función tanto de su capacidad interna como de la capacidad de ecosistemas más amplios de sostenerlo” (Córdova, Villagrana, 2015, p.63). Cualquiera sea la forma, el tamaño o la complejidad de la ciudad, siempre estará constituida por componentes que interaccionan de manera continua con elementos del entorno (energía, materia e información) para mantener la vida, crecimiento y sostenibilidad a partir del desarrollo de diversas funciones.

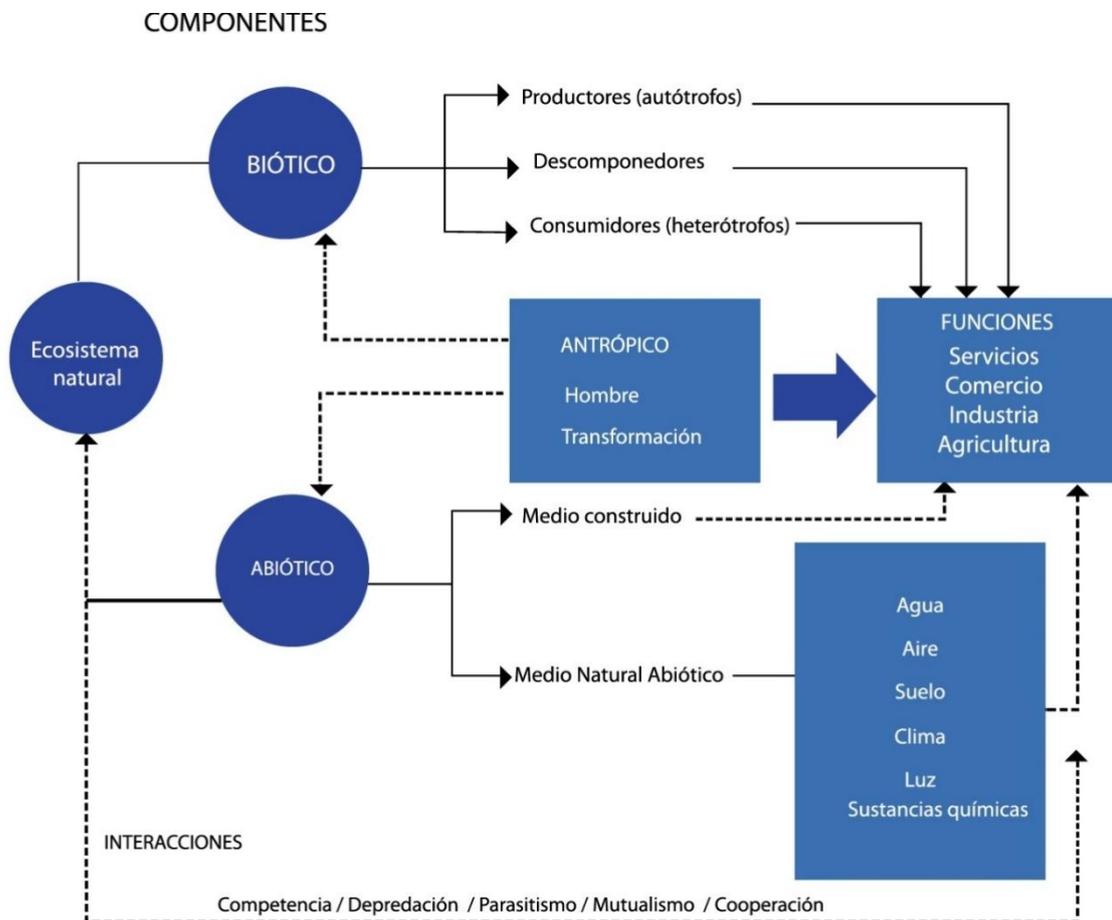
2.1.Componentes y funciones

De manera análoga a la estructura del ecosistema, las ciudades están conformadas por *componentes bióticos y abióticos*. El primero, es la comunidad de especies autótrofas y heterótrofas, en las cuales el hombre es la especie dominante. El segundo, es el medio físico

⁹Según Polése (1998) “en el caso de muchos fenómenos biofísicos, desconocemos los efectos casusa y efecto; además, las empresas pueden tener interés en ocultar ciertas informaciones acerca de la nocividad de sus productos. Cuanto más imperfecta es la información, menos eficaz es el mercado” (p.128).

integrado por *el medio natural abiótico*, es decir, los factores del ambiente tales como la luz, sustancias químicas; y, *el medio construido*, referido a la infraestructura “dura o artificial” que se forma sobre la base natural que soporta la vida e interacciones del hombre en términos de producción, comercialización, distribución y consumo de bienes y servicios (acueducto, energía, alimenticio, culturales, etc.), donde la infraestructura de comunicación y transporte juegan un papel vital en las interacciones (Figura 4).

Figura 4. Componentes generales del ecosistema urbano



Fuente: Elaboración propia.

Las funciones de la ciudad inciden en su estructura y estas a su vez, afectan las funciones. De acuerdo a Capel (1972) las funciones de la ciudad son “el conjunto de relaciones entre

actividades que se influyen entre sí regularmente por medio de asociaciones que hacen posible la operación de continuidad del sistema. Función es, por lo tanto, sinónimo de actividad (Esteva, 1965) [...] además, agrega que es la función urbana la que impone el modo de vida y constituye la razón de ser de la ciudad” (p.218).

De acuerdo al autor, por muchos años las funciones de las ciudades se determinaban intuitivamente según la apreciación de quien estuviera analizando el tema. Una de las primeras aproximaciones la hace M. Arousseau en 1921, distinguiendo 6 tipos principales de funciones: *administración, defensa, cultura, producción, comunicaciones y ocio*. Por su parte, Chabot (1948), aporta la primera clasificación francesa al tema con la siguiente distinción: “1) *función militar (fortalezas o puertos de guerra, por ejemplo)*; 2) *función comercial, que considera la más extendida*; 3) *función terapéutica, de veraneo y turismo*; 4) *función industrial, incluyendo la ciudades mineras*; 5) *función intelectual y religiosa*; 6) *función administrativa*”. Posteriormente, el enfoque de los estudios se volcó a “investigar simultáneamente todas las características del sistema urbano, es decir, no sólo las características económicas o funcionales, analizadas por lo general, a partir de la estructura profesional, sino también de las características sociales en su sentido más amplio, demográficas, morfológicas e incluso políticas e institucionales” (Capel, 1972, p.230). En este orden de ideas, la tabla 1 muestra las funciones de las ciudades según el método para llegar a la clasificación (intuitivo u observación directa y cuantitativo) realizado por diversos estudiosos del tema.

Tabla 1. Tipos de funciones en las ciudades según diversos autores

Según métodos intuitivos	
Funciones	Autor
<ol style="list-style-type: none"> 1. Administración 2. Defensa 3. Cultura 4. Producción 5. Comunicaciones 6. Ocio 	M. Arousseau, 1921
<ol style="list-style-type: none"> 1. Función militar (ciudades,-fortalezas o puertos de guerra, por ejemplo) 2. Función comercial, que considera la más extendida 3. Función terapéutica, de veraneo y turismo 4. Función industrial, incluyendo la ciudades mineras 5. Función intelectual y religiosa 6. Función administrativa 	Chabot, 1948
<ol style="list-style-type: none"> 1. Funciones sociales (militar, espiritual y política) 2. Funciones de intercambio 3. Funciones industriales 4. Funciones de ocio 	Max Sorre, 1952
<ol style="list-style-type: none"> 1. Centros fabriles o de producción 2. Centros mercantiles o de comercio 3. Centros políticos y administrativos 4. Centros culturales o educativos 5. Centros de veraneo o recreo 6. Centros militares 	N. P. Gist y S. F. Fava, 1964
Según métodos cuantitativos	
Funciones	Autor
<ol style="list-style-type: none"> 1. Agricultura 2. Industria 3. Comercio 4. Servicios 	Determinación intuitiva del umbral SANDRUC, UCU y POGHIRC, 1963. LE GUEN, 1960
<ol style="list-style-type: none"> 1. Administración 2. Defensa 3. Cultura 4. Producción 5. Comunicación 6. Recreación 	Los métodos aritmético-estadísticos Smith, 1965

Fuente: Elaboración propia con base Capel, 1972.

Las interacciones de un ecosistema urbano se dan simultáneamente entre sus diferentes actividades o funciones (industria, comercio servicios, etc.) y, entre éstas con los componentes bióticos y abióticos (entorno físico) del ecosistema; de modo que, la ciudad se constituye en una “red compleja de actividades socioeconómicas y naturales con una amplia gama de materiales y cambios de energía que ocurren dentro y entre sus actividades” (Zhang, et al. 2015, p.3) y su entorno físico.

Las interacciones entre las funciones y componentes del ecosistema urbano, de acuerdo a sus características (tamaño, diversidad, flexibilidad, etc.), pueden ser de *competencia*, “cuando los recursos del ecosistema en que se desarrollan son insuficientes para suplir las necesidades de todos los individuos que habitan allí” (Dimitri y Zavattieri, 1992, p.92); *depredación* y *parasitarias* en los casos que un componente o función se beneficia de otra que es perjudicada en la interacción. En contraste, las relaciones de *mutualismo* y *cooperación*, los componentes y actividades se benefician mutuamente.

Para acercarse a la comprensión de esta red de actividades, funciones e interacciones, diversos autores (Zhang, Xia, Yang, Conke, Warren, Mostafavi) analizan la ciudad a la luz del concepto de metabolismo urbano como análogo al metabolismo del ecosistema, “donde el intercambio constante con el medio ambiente permite su funcionamiento, crecimiento, reproducción” (Inostrosa, 2013, p.31).

2.2. Metabolismo urbano

El Metabolismo urbano se concibe como la suma total de procesos técnicos y socioeconómicos (Kennedy et al. 2007) de consumo de recursos y generación de residuos que

ocurren en las ciudades a través de apropiación, transformación, circulación, secreción, emisiones y uso de los recursos (Zhang, 2013) propios y del entorno, que en su conjunto, representa el flujo metabólico de la ciudad. En las operaciones de **apropiación (input)**, la ciudad absorbe materias, energía e información que necesita para mantener y desarrollar sus funciones, siendo esenciales elementos como el agua, los alimentos y el combustible. La **transformación** son los cambios que se producen en los materiales que son apropiados de la naturaleza para obtener productos manufacturados y servicios. En la **circulación** se distribuye la materia, energía e información captada, transformada o no, a través de diferentes medios de transporte; mientras que, en los procesos de **secreción (output)**, la ciudad expulsa sustancias en forma de residuos (aguas residuales, desechos sólidos, elementos de contaminación del aire) y energía en forma de calor, en diferentes cantidades y cargas contaminantes, ya sea dentro de la ciudad o los exporta a otros ecosistema urbanos. A diferencia del metabolismo en las células, parte de los residuos no pueden ser reutilizados, lo que rompe con el proceso cíclico metabólico y genera contaminación.

Las ciudades como estructuras disipativas, llevan a cabo estas operaciones a través del proceso social de trabajo (Inostrosa, 2013); sin mantener el equilibrio, autorregulación y máxima economía que si se da en el metabolismo de los organismos. En este sentido, el metabolismo urbano incorpora el territorio, o parte de él, a la ciudad “mediante procesos que llevan asociado un cambio antropogénico del espacio, que puede ser intencionado, como la tala de bosques y la urbanización, o no intencionado como la erosión o la pérdida de biodiversidad” (Toledo 2002, citado por Inostrosa, 2013, p. 32). Estos impactos se extienden tanto al espacio urbano como a los ecosistemas exteriores (Inostrosa, 2013), de hecho, si los procesos metabólicos son insostenibles, pueden causar el agotamiento de recursos, afectando el entorno en la escala local y regional. (Zhang, et. al., 2015).

Desde el enfoque cuantitativo, algunos autores definen el metabolismo urbano como la evaluación de la cantidad de recursos producidos y consumidos por ecosistemas urbanos (Conke y Ferreira, 2015) que permite como método analítico, comprender el impacto del desarrollo urbano (Mostafavi, et al., 2014). Conke y Ferreira (2015) señalan que la medición del metabolismo permite entender cómo el desarrollo de una ciudad causa impactos al entorno local y regional; además, brinda insumos para el diseño y planificación de las ciudades de modo que contribuyan con el desarrollo sostenible.

De acuerdo a Kennedy et al. (2011), un análisis de metabolismo puede ser utilizado para alcanzar cuatro objetivos principales: el primero, relacionado con la evaluación de materiales y flujos de energía en una ciudad. El segundo, de uso reciente en el contexto de cambio climático, es cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El Tercero y cuarto, es identificar los factores que determinan el uso de materiales (agua, carbón, cobre, etc.) y energía en la ciudad para apoyar decisiones de política pública. En efecto, para tratar con problemas como la contaminación, el tratamiento de aguas residuales, la escasez de recurso, la escasez de agua, por citar algunos ejemplos, se utilizan diferentes técnicas cualitativas y cuantitativas que permiten identificar las relaciones entre diferentes componentes de un ecosistema urbano y los efectos que tienen sobre el sistema natural y construido.

Conke y Ferreira (2015) señalan que los principales retos a la hora de realizar las mediciones de metabolismo urbano, ya sea general o particular para un material, es la disponibilidad de datos e información y el grado de confiabilidad de las estadísticas disponibles a nivel local; además, indican que es fundamental tener en cuenta que, es imposible completamente evaluar cualquier metabolismo urbano pues las ciudades están presentes en mercados globales y su

sostenibilidad y crecimiento depende de recursos disponibles en otras partes; así, un análisis metabólico sólo sería completo si fuera capaz de identificar las relaciones complejas que se dan en la ciudad como sistema en la que se describan por completo los orígenes y destinos de los recursos, bienes producidos y residuos.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, diversos autores ha analizado los principales flujos de un solo material o elemento dentro del metabolismo urbano como agua (Tambo, 2002, Zhang et al, 2010), la energía (Huang, 1998; Zhang et al, 2011), cobre (Gordon et al, 2006; Tanimoto et al., 2010), nitrógeno (Forkes, 2007; Saikku et al, 2007), emisiones de carbono (Sovacool y Brown, 2009; Karakiewicz, 2011, Kennedy et al., 2010) (Zhang, et al., 2015). En la actualidad, existen diversas críticas al concepto, tales como, la falta de inclusión de “instancias y mecanismos de carácter no material (instituciones, sistemas simbólicos, reglas jurídicas, etc.) con las cuales y dentro de los cuales el metabolismo tiene lugar” (Toledo, 2013, p.51). Pese a estas falencias, el análisis de metabolismo urbano es valioso como herramienta que permite una aproximación a la comprensión de los flujos de entrada, internos y de salida de la ciudad, además, estos ejercicios generan insumos valiosos a la hora de intervenir y planificar las ciudades.

2.2.1. Metabolismo urbano del agua potable

Teniendo en cuenta que el agua es un material esencial que permite la supervivencia de todos los ecosistemas, particularmente, el ecosistema urbano, a continuación se realiza una análisis descriptivo del metabolismo urbano del agua potable considerando el flujo del material en la ciudad por medio de su principal estructura disipativa para la circulación de éste material: El sistema de acueducto.

Tal y como se mencionó en el apartado anterior, el metabolismo urbano consta de tres procesos: 1) Entradas o inputs, 2) Transformación y 3) Salidas (outputs) que en su conjunto, albergan las operaciones de apropiación, transformación, circulación y excreción. En el metabolismo del agua potable de una ciudad, el Input está representado por la operación de *apropiación* que implica la *absorción (captación)* del agua cruda de fuentes hídricas superficiales o subterráneas por medio de una estructura disipativa como el acueducto por ejemplo, así como su *utilización representada en el consumo del agua potable*, operación que hace que el agua ingrese efectivamente a las diferentes unidades de consumo de la ciudad (residencial, industria, comercio, oficial y otros). En este caso, “el proveedor de este tipo de flujos es el medio ambiente y el usuario es el sector económico responsable de la extracción” (DANE, 2012, p. 15).

Entretanto, el proceso metabólico de *transformación*, va acompañado de la circulación del agua en dos sentidos: hacia las entradas y las salidas. El primero, se refiere a la operación de potabilización y distribución del agua para su consumo en los diferentes sectores económicos y hogares, realizado por medio de una estructura disipativa, que en el caso del agua potable, es el sistema de acueducto. El segundo, es la transformación del agua consumida en aguas residuales domésticas, definidas como “los residuos líquidos procedentes de viviendas, generados principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas” (ACUACAR, s.f.), así como los vertimientos que proceden del resto de sectores de consumo (instalaciones comerciales, industriales, etc.).

Finalmente, las aguas residuales en diferentes cantidades y cargas contaminantes representan las *salidas (output)* del metabolismo del agua potable de un ecosistema urbano a través de otra estructura disipativa: el sistema de alcantarillado, conformado por una red de estructuras

y tuberías que transportan las aguas residuales desde el sitio que las genera hasta el lugar de tratamiento y posterior vertimiento, ya sea dentro de la ciudad o en otro ecosistema. Estos son flujos desde la economía hacia el medio ambiente, se caracterizan por no estar disponibles para biodegradación por saturación de sustancias que no se metabolizan, lo que rompe con el proceso metabólico y genera contaminación.

Figura 5. Metabolismo urbano del agua potable residencial



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Teorías económicas asociadas al metabolismo urbano del agua potable

Las operaciones de *apropiación (input) de agua potable* están en función de la demanda de bienes y servicios en la ciudad. Al respecto, la Teoría de Marshall señala que la cantidad de un bien o servicio que están dispuestos a adquirir los individuos en un determinado periodo de tiempo, depende del precio de bien (P_X), el precio del bien sustituto (P_S) y complementario (P_C), el precio futuro esperado (P_E), el ingreso (I) y los gustos del consumidor (G). La suma de las demandas individuales (Q_{it}) da como resultado, la demanda del mercado (Q_{mt}).

$$(1) \quad Q_{it} = P_X + P_S + P_C + P_E + I + G + \mu. (2) \quad Q_{mt} = \sum Q_{it}$$

Si el precio del bien aumenta, manteniendo constante el resto de variables, las cantidades demandadas del bien disminuyen. En otras palabras, los consumidores demandarán más de un bien a medida que su precio se reduce; sin embargo, cuando un bien tiene pocos (o no tiene) sustitutos, su demanda será más inelástica; es decir, menos sensible a incrementos en el precio. La demanda de agua es un ejemplo de un mercado que tiende a ser inelástico al precio, pues no existen bienes sustitutos o complementarios a este material.

Ahora bien, los individuos asignan sus ingresos a la canasta de bienes que les representa el mayor grado de satisfacción (Teoría del Consumidor). Estas decisiones están determinadas por sus gustos, el precio de cada bien y la restricción presupuestal (ingreso limitado en un periodo de tiempo). Todos los puntos sobre la restricción presupuestaria forman el conjunto de bienes de la canasta asequible al consumidor, según sus ingresos y precios (Gráfico 2). El individuo variará su canasta de consumo ante cambios en su nivel ingresos, así como en los bienes o servicios que conforman su canasta, ya sean bienes de lujo, primera necesidad e inferior (Gráfico 3); sin embargo, el agua es un *bien de primera necesidad*, de modo que la variación del ingreso del individuo poco afectará su demanda.

Gráfico 2. Restricción presupuestal

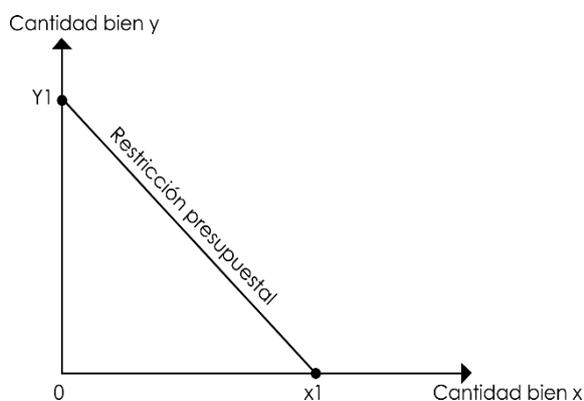
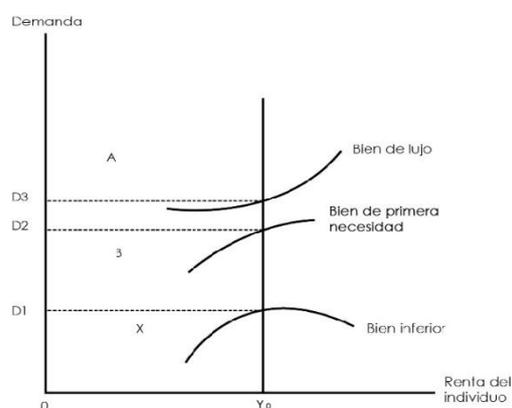


Gráfico 3. Demanda según el tipo de bienes



Fuente: Elaboración propia con base en la teoría del consumidor (gráfico 2) y los tipos de bienes en la relación de demanda/renta de Engel (gráfico 3).

Diversos estudios, “Jones & Morris (1984), Lyman, (1992), Garn (1996), Höglund (1999), Saleth y Dinar (2001) y Jaramillo (2003), consideran que el agua es consumida en los hogares en conexión con diferentes tareas o consumo de bienes finales (electrodomésticos, jabón, etc.) y que cada tarea envuelve, en la mayoría de los casos, el uso de la energía eléctrica” (Guzmán, García, Rebollar y Hernández, 2011, p.205).

Desde la economía ambiental, la demanda de agua en un ecosistema urbano también depende del grado de urbanización, los sistemas de explotación y distribución, así como las formas de producción agrícola, según los requerimientos de los cultivos, los sistema de riego, y la producción industrial (Perelló, 1996, p. 33) que “escoge el nivel de utilización del insumo; de tal manera que su costo se producción sea minimizado” (Guzmán, et. al., p.205).

Para que el agua entre efectivamente al ecosistema urbano, es necesario someterla a un proceso de *transformación* de su estado original (agua cruda) a fin de producir un bien apto al consumo final o insumo de procesos de producción. Este proceso de transformación a escala urbana, se lleva a cabo en la empresa de acueducto, como estructura disipativa que utiliza los factores de producción (tierra, trabajo y capital) para transformar el bien al menor costo unitario y en las cantidades que pueden vender en el mercado. Es importante tener en cuenta que, según la Teoría de la Producción, las cantidades ofertadas de un bien son inversamente proporcionales al precio de los factores de producción, bienes sustitutos en la producción y las expectativas de los consumidores respecto al precio; asimismo, guardan una relación directa con el número de oferentes, los avances tecnológicos y el precio de los bienes complementarios en la producción.

En consecuencia, aumentará la oferta del bien en los casos que se presenta reducción en el precio de los factores o bienes sustitutos en la producción, el precio del bien es inferior al

esperado, aumenta el número de oferentes del mercado o se presentan avances tecnológicos que permiten a la empresa combinar con mayor eficiencia los factores productivos, de modo que, obtiene más cantidad del bien con las misma cantidad de factores.

Siguiendo esta teoría, la cantidad de agua *transformada como bien apto para el consumo (input)* depende de la disponibilidad y precio de los factores productivos (acceso a fuentes de agua, sistemas de explotación y distribución del recurso, topografía, etc.), el número de oferentes y los avances tecnológicos en el proceso de potabilización y distribución que permiten a la empresa tener mayor eficiencia en el uso de sus factores de producción. En este proceso se generan pérdidas de materia y energía, tal y como lo señala la Segunda Ley de la Termodinámica, referida a la entropía presente en todos los sistemas. Al respecto, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico –CRA (2007), señala que las pérdidas de agua son de tipo: (1) Comercial, por el consumo no facturado, el cual incluye usuarios en asentamientos ilegales, uso de hidrantes, riego de parques públicos, etc.; y, (2) Técnicas debido a las fallas en los conductos de la red, fugas en las conexiones y vertimientos en los embalses de almacenamiento. Las pérdidas de agua generan costos asociados a aspectos del medio ambiente, conservación de recursos y económicos para consumidores y prestadores del servicio:

“(a) Los costos ambientales dependen del impacto de los proyectos de extracción y distribución, así como de las medidas de mitigación a implementar, (b) Los costos asociados a la conservación de los recursos corresponden no exactamente al posible agotamiento de las fuentes, ya que estos recursos son renovables, sino más bien al gradual incremento de los costos de fuentes alternativas y a la pérdida de oportunidades de usos alternativos, como irrigación, recreación, insumo industrial, entre otros, (c) Los costos económicos para la empresa e indirectamente para los consumidores debido a la transferencia de ineficiencia vía

tarifa, ya que se estarían aplicando recursos financieros a la extracción, transmisión, tratamiento, almacenamiento y bombeo de volúmenes de agua que finalmente no son consumidos por el cliente ni facturados por el prestador del servicio” (CRA, 2007, p. 1).

Pese a las pérdidas presentadas en el proceso de transformación y distribución del agua, los precios al consumidor no se afectan significativamente pues están altamente regulados, teniendo en cuenta que el mercado de agua es monopolístico, caracterizado por tener pocos oferentes y restricciones a la entrada de nuevos oferentes, además, es un bien de primera necesidad que no cuenta sustitutos cercanos.

La cantidad de agua *transformada en aguas residuales (output)* depende de la cantidad de agua consumida por la población y la manera como ésta es utilizada en la producción de bienes y servicios. La cantidad de agua doméstica residual (Q_{RD}) “varía en función de la producción diaria que depende de las *costumbres de consumidor* (horarios de trabajo, tipo de diversiones, días de lavado, etc.) y del *nivel de comodidad de las viviendas* (baños, piscina, climatización, etc.)” (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Cooperación Técnica República Federal de Alemania -CEPIS, 1990, p.36). Por su parte, la cantidad y carga contaminante de vertimientos de la industria depende del tipo de actividad específica que realiza este sector, la magnitud de la inversión en tecnologías de prevención y control de vertimientos industriales, así como el control ejercido por el regulador (Moreno, 2007).

De acuerdo con la economía ambiental, las aguas residuales generan externalidades negativas que hacen que la maximización del bienestar individual no coincida con la maximización del bienestar social. En consecuencia, “los costos privados son pasados a la sociedad, lo que indica una falta de adecuación con los sociales” (Chang, 2001, p.180). De modo que, el

Estado interviene para internalizar “aquellos costos individuales que quedaron fuera del mercado mediante un impuesto que corresponda con el valor del costo social infringido a la colectividad. Este procedimiento se efectúa, en materia ambiental, según el principio del “Contaminador-pagador” (Polluter’s Pays Principle)” (Chang, 2001, p.180).

Chang señala que “con el impuesto, el costo de producción de la empresa contaminadora pasa a ser mayor, al mismo tiempo que el beneficio disminuye en la misma medida. Salvo cuando el nivel de la competencia permite pasar el valor del impuesto al consumidor, el precio final del producto, aumenta. De esa manera, los efectos externos son internalizados y el medio ambiente es incorporado al mercado”. (p.180)

De acuerdo al autor, es fundamental tener en cuenta que la carencia de reglas claras para aplicar sobre el medio ambiente, siempre propicia el desperdicio o degradación de cualquier recurso natural.

2.3. Aproximación al método de medición

Partiendo del planteamiento teórico de metabolismo urbano y estudios relacionados con los determinantes del consumo de agua residencial y vertimientos de residuos, se propone analizar las relaciones entre Input y Output del proceso metabólico del agua potable del sector doméstico mediante la formulación de un modelo de ecuaciones simultáneas en dos etapas. La primera etapa es la estimación de la ecuación de demanda “Consumo de agua residencial”, partiendo del supuesto de que el consumo del recurso en cada sector es independiente entre sí.

Ecuación de demanda (1) Consumo de agua residencial:

$$(1)C_{ARt} = \beta_{11} + \beta_{12} I_{t-1} + \beta_{13} P_{ESTRt-1} + \beta_{14} T_{Pt} + \beta_{15} Prec_t + \beta_{16} U_{RBt} + \beta_{17} C_{OBt} + u$$

Donde,

C_{ARt} = Consumo promedio de agua residencial (m^3 /habitante)

I_{t-1} : Ingreso con un año de rezago (\$)

$P_{ESTRt-1}$: Precio del agua potable ($\$/m^3$)

T_{Pt} : Temperatura media anual (C°)

$Prec_t$: Precipitación (mm)

U_{RBt} : Nivel de urbanización (%)

C_{OBt} : Cobertura de acueducto (%)

En la segunda etapa, se instrumenta la variable de Consumo de agua residencial (1) en un modelo de aguas residuales (Ecuación 2) para identificar la relación de la cantidad consumida de agua y sus factores determinantes (Input) en las aguas residuales (output). Esta ecuación (2) está especificada de la siguiente manera:

$$(2)V_{ERTt} = \beta_{21} + \beta_{22} Q_{CARt} + \beta_{23} Q_{Ct} + \beta_{24} C_{OBA_t} + \beta_{25} Prec_t + \beta_{26} D_{POBt} + u$$

Donde,

V_{ERTt} = Vertimientos (m^3)

Q_{CARt} = Cantidad consumida de agua para uso residencial (m^3).

Q_{Ct} = Cantidad de consumo de agua de la principal actividad económica de la ciudad (m^3)

C_{OBA_t} = Cobertura de alcantarillado (%)

$Prec_t$ = Precipitación (mm)

D_{POBt} = Densidad poblacional urbana (Hab/área urbana)

T_{AMB} = Tarifa ambiental

2.3.1. Método de estimación Mínimos Cuadrados en Dos Etapas (MCO2E)

El método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) permite estimar las relaciones entre las variables de un modelo, minimizando la sumatoria de los errores; es decir, la parte de la estimación que no se alcanza a explicar a través de las variables especificadas en la ecuación. Existen casos que el modelo lo conforman ecuaciones simultáneas que tienen “alguna de sus regresoras endógenas y, por consiguiente, es probable que estén correlacionadas con el término de error” (Gujarati, 2003, p.727). Para que este tipo de estimaciones sean consistentes, Henri Theil y Robert Basmann desarrollaron el método *Mínimos Cuadrados Ordinarios en Dos Etapas* (MCO2E), que consiste en dos aplicaciones sucesivas de MCO, para “purificar la variable explicativa influenciada por el término error” (Gujarati, 2003, p. 745), tal y como se muestra a continuación:¹⁰

- 1. Primera etapa:** Para eliminar la correlación probable entre la regresora endógena (Y_1) y el término error (u_2), se lleva a cabo la regresión sobre todas las variables predeterminadas en el sistema completo:

$$(1) \quad Y_{1t} = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + u_1,$$

Donde, u_1 son los residuos de MCO. A partir de allí se obtiene:

¹⁰Los desarrollos formales que se presentan a continuación provienen del libro “Econometría” de Damodar Gujarati (2003).

$$(2) \quad Y_{1t} = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} ,$$

Donde Y_{1t} = Variable observada y, Y_{1t} = Variable estimada

$$(3) \quad Y_{1t} = Y_{1t} + u_1$$

- 2. Segunda etapa:** Se reemplaza Y_{1t} que aparecen en la ecuación original por sus valores estimados en la primera etapa, y se aplica Mínimos Cuadrados Ordinarios a la nueva ecuación obtenida. “Los estimadores así obtenidos son consistentes, es decir, convergen hacia sus verdaderos valores a medida que el tamaño de la muestra aumenta indefinidamente” (Gujarati, 2003, p.745).

$$\begin{aligned} Y_2 &= \beta_{20} + \beta_{21}(Y_{1t} + u_1) + u_{2t} \\ &= \beta_{20} + \beta_{21}(Y_{1t} + u_1) + u_{2t} \\ &= \beta_{20} + \beta_{21}Y_{1t} + u_t^* \end{aligned}$$

Donde $u_t^* = u_{2t} + \beta_{21}u_1$.

La congruencia estadística se determina por medio de la prueba t de Student para la significancia por variable, la prueba F para la significancia global de cada ecuación, el estadístico Durbin Watson (h) para el nivel de autocorrelación, la prueba Estadístico Skewness/Kurtosis para determinar la normalidad de las variables y el estadístico Breusch-Pagan / Cook-Weisberg para el test de heterocedasticidad. De igual forma, los coeficientes resultantes del modelo se deben validar con las teorías propuestas. Para el cálculo de los parámetros del modelo, así como las pruebas de congruencia estadística, se utiliza el software STATA.

2.3.2. Variables e indicadores

Las variables propuestas para las ecuaciones 1 y 2, así como los indicadores considerados para la medición, se presentan a continuación, haciendo referencia a la forma de cálculo, unidad de medida, fuente y justificación.

a. Consumo de agua residencial (C_{ARt})

De acuerdo al DANE, es el consumo promedio de agua por habitante cuyas viviendas tienen conexión a la red de agua de la ciudad. Por su parte, la Comisión Nacional de Agua de México (2005) lo define como el consumo promedio de agua en litros por día por persona para todos los usos domésticos; mientras que, La Junta de Castilla y León en España, indica que es el volumen de agua contratada y distribuida para abastecimiento público. Esta variable puede medirse para diferentes periodos según se requiera (mensual, trimestral, semestral, anual).

Indicador: Consumo promedio anual de agua residencial por habitante.

Forma de cálculo: En Colombia, los metros cúbicos de agua se obtienen a partir del promedio del dato mensual que arroja el medidor de agua, el cual captura cada entidad prestadora de servicio público de agua. Esta información es registrada en el Sistema Único de Información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios). Entretanto, el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), suministra las estadísticas de población. La forma de cálculo es:

$$m^3 \text{ promedio de consumo residencial} / \text{Número de habitantes}$$

Fuente: Superservicios y DANE. **Unidad de medida:** m³ por habitante.

Justificación: El consumo es una de las variables de presión a la oferta del recurso hídrico, por ello, es fundamental considerarla en el análisis metabólico de una ciudad. En particular, el consumo doméstico abarca funciones esenciales como abastecimiento de agua a la población, reconocido a nivel normativo como una prioridad a la hora de planificar el territorio y asignar recursos (ONU HABITAT, 2013), así como uno de los fines principales de la actividad del Estado de acuerdo la Constitución Política de Colombia.

b. Consumo de agua por actividad económica (Q_{Ct})

Se refiere al consumo promedio anual de agua por actividad económica (comercio, servicios, industria, etc.) que tiene conexión a la red de agua de la ciudad.

Indicador: Consumo promedio anual por actividad económica

Forma de cálculo: De igual forma que el consumo residencial, los m³ de agua consumida por actividad económica se obtienen a partir del promedio del dato mensual que arroja el medidor de agua de los usuarios no residenciales. La entidad prestadora del servicio público captura los datos, luego, los registra en el Sistema de Información Único de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Fuente: Superservicios y DANE. **Unidad de medida:** metros cúbicos (m³).

Justificación: En Colombia, el consumo de agua se concentra principalmente en los sectores: agrícola, energía, doméstico e industrial, siendo los tres últimos, los que están vinculados con un porcentaje mayoritario de la sociedad asentada en las ciudades. Probablemente, esta es una de las variables más directas de aproximación de los individuos con la gestión del agua.

c. Ingreso (I_{t-1})

De acuerdo al Banco de la República de Colombia (2015), los ingresos, en términos económicos, son todas las entradas económicas que recibe una persona, familia, empresa, organización, gobierno, territorio, entre otros. En el caso del ingreso del individuo, el DANE lo define como las personas con más de 10 años de edad que reciben entradas económicas periódicas por trabajo u otras fuentes; mientras que, el ingreso del hogar “es la suma de los ingresos de todos sus miembros y los que se captan de manera conjunta, tanto en efectivo como en especie” (CEPAL, s.f., p.325). A nivel de territorio, el ingreso es el valor agregado de todos los bienes y servicios generados en una economía.

Indicador: el Producto Interno Bruto por habitante (PIB Percapita) como una proxy de medición del ingreso.

Forma de cálculo: Se divide el Producto Interno Bruto (\$) entre el número de habitantes del territorio. En Colombia, el PIB se mide desde tres puntos de vista: a) demanda final de los bienes y servicios, b) oferta o valor agregado y, c) ingresos primarios generados por las unidades de producción residentes, tal y como se muestra a continuación:

“PIB desde el punto de vista del valor agregado: Es la suma del valor Agregado (VA) bruto de las unidades de producción residentes, más los impuestos (I), menos las subvenciones sobre los productos (S). **PIB desde el punto de vista de la demanda final:** Es la suma de las utilizaciones finales de bienes y servicios medidas a precio comprador, menos las importaciones de bienes y servicios. **PIB desde el punto de vista de los ingresos:** El PIB es igual a la suma de los ingresos primarios generados por las unidades de producción residentes: $PIB = RA + Ip + EBE + IM$, Donde: RA= remuneración a los asalariados Ip= impuestos a la producción y las importaciones EBE= excedente bruto de explotación IM= ingreso mixto” (DANE, 2015, p. 2).

En Colombia, la medición del PIB se realiza a nivel nacional (total), por departamentos y ramas de actividad económica.¹¹

Fuente: DANE a través de las Cuentas Nacionales y proyecciones poblacionales.

Unidad de medida: Millones de pesos por habitante (\$ / Hab.).

Justificación: Un aumento en los ingresos representa una mejora en el poder adquisitivo, lo que lleva a mayores niveles de consumo debido a estándares de vida más exigentes de los hogares. Lo anterior, implica incrementos en la construcción de obras residenciales, así como hogares que compran más bienes que consumen agua (aparatos, electrodomésticos) o realizan adecuaciones en las viviendas, tales como, baños adicionales, piscinas, etc.

¹¹ Grandes ramas de actividad económica: 1) Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, 2) Explotación de minas y canteras, 3) Industria manufacturera, 4) Electricidad, gas y agua, 5) Construcción, 6) Comercio, reparación, restaurantes y hoteles, 7) Transporte, almacenamiento y comunicaciones, 8) Establecimientos financieros, seguros, actividades inmobiliarias y servicios a las empresas, 9) Actividades de servicios sociales, comunales y personales.

d. Precio del agua potable ($P_{ESTRt-1}$)

Cantidad de dinero que se cobra por la prestación del servicio. En el caso del agua potable, es la tarifa “que refleja los costos del agua para lograr la cobertura (accesos de la mayoría de los consumidores a servicios de agua apropiados) y para garantizar la fiabilidad del servicio, considerando, tanto subsidios como ganancias y pérdidas” (Swiss Agency for Development and Cooperation –SDC, 2008, p.2). En este sentido, la Superservicios de Colombia (2010), define el precio o tarifa del agua potable como el precio que se cobra por la prestación del servicio, el cual refleja los costos en los que incurre la empresa para prestarlo. En Colombia, hay tres niveles de tarifas por consumo: Básico (QB), Complementario (QC) y Suntuario (QS).

Indicador: Tarifa básica de agua potable.

Forma de cálculo: De acuerdo al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005), la forma de cálculo de la tarifa básica es la siguiente:

“Se basa en el cálculo de los costos medios asociados con la prestación del servicio, es decir con los costos medios de inversión, operación, tasas ambientales y administración que garanticen la sostenibilidad del sistema., la metodología se caracteriza por su flexibilidad, lo cual quiere decir que permite determinar los costos y tarifas en función del nivel y calidad del servicio existente o deseado, por ejemplo las inversiones relacionadas con el aumento de cobertura, de micromedición, de calidad del agua tratada, etc”. (p. 40).

Fuente: Superservicios. **Unidad de medida:** Tarifa \$/usuario/mes.

Justificación: En concordancia con la Teoría de la Demanda, existen diversos estudios (Troust y Villegas, 2013; Vivas, 2001; García y Muñiz, 2004; Nieswiadomy y Molina, 1991) que señalan el precio del agua como uno de los factores que inciden en consumo de este recurso, constituyéndose en un instrumento de control de la demanda.

e. Temperatura media (T_P)

“Es el promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie del suelo y la temperatura superficial del mar”, es usado generalmente por las principales organizaciones internacionales para sustentar los cambios en el temperatura (OMM, IPCC, citado por IDEAM, 2012, p.9).

Indicador: Temperatura promedio anual.

Forma de cálculo: De acuerdo al IDEAM (2014), en Colombia:

“El proceso de cálculo del indicador parte de la disponibilidad de datos oficiales de temperatura ambiente registrada en el termómetro seco a las 7:00 (T_{07}), 13:00 (T_{13}) y 19:00(T_{19}) o 18:00, reportadas para las estaciones de monitoreo que conforman la red meteorológica de los países. El procedimiento implica la selección de la estación o estaciones que resulten representativas del área para la cual se calculará el indicador”. La fórmula de cálculo es:

$$TMD_{ij} = \frac{T_{07} + T_{13} + (2 * T_{19})}{4}$$

Fuente: IDEAM. **Unidad de medida:** Grados Celsius C°.

Justificación: Este indicador, además de ser utilizado para medir el cambio climático, es considerado por diversos autores (Centro de Estudios Hidrográficos, 2012; Worthington y Hoffman, 2006) como factor que incide la demanda de agua, pues a medida que aumenta la temperatura o ésta es superior a un nivel dado¹², se incrementa el consumo de este recurso, especialmente, en el sector doméstico. En este sentido, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico –CRA (2016) de Colombia “estipula rangos de consumo para los servicio público domiciliario de acueducto, en función de la altura sobre el nivel del mar de la ciudad o municipio respectivo” (p.3).

f. Precipitación (P_{PRECt})

“Corresponde a la cantidad de agua que llega al suelo en forma de lluvia, rocío, granizo o nieve; contabilizada durante *i* periodos, en la estación *j* durante el tiempo *t*” (IDEAM, 2014, p.1).

Indicador: Precipitación promedio anual.

Forma de cálculo: “Se agregan los datos de precipitación contabilizados por una misma estación durante los lapsos de tiempo que cubra el periodo para el cual se desea calcular el indicador.” (IDEAM, 2014, p.2). La fórmula de cálculo es la siguiente:

¹²Según el Centro de Estudios Hidrográficos (2012) en municipios de España “con un gran número de días con temperatura superior a 35°C, los consumos de agua en viviendas unifamiliares experimentan un aumento significativo a lo largo del siglo XXI” (p.12). En el caso de ciudades en Estados Unidos, la temperatura incide en el consumo de agua en niveles superiores a 21 C° (Worthington y Hoffman, 2006).

$$\text{PRE } jt = \sum_{i=1}^n (ca)$$

Donde: *Ca* es la Cantidad de agua que se precipitado; *n* es el número total de lapsos de tiempo para los cuales se ha contabilizado el dato de precipitación.

Fuente: IDEAM. **Unidad de medida:** milímetros (mm).

Justificación: Diversos estudios (Moreno, Ibáñez y Cubillo; Centro de Estudios Hidrográficos, 2012) señalan que las precipitaciones tienen un efecto significativo en el consumo de agua de las viviendas con uso exterior (jardines), siendo inversamente proporcional.

g. Cobertura de acueducto (COBT)

Es el porcentaje del total de viviendas que tienen acceso sostenible a métodos de abastecimiento de agua adecuados¹³, en una unidad espacial y periodo de tiempo determinado (DANE, 2009). La Superservicios (2015) lo define como “el porcentaje de predios con acceso al servicio de acueducto en el área urbana y rural del municipio”. (p. 1).

Indicador: Cobertura de acueducto anual

¹³De acuerdo al DANE (2009), los métodos adecuados “son alternativas de abastecimiento de agua que cuentan con infraestructura para su captación, tratamiento (mínimo desinfección), conducción y distribución o con dispositivos para la extracción del agua, que son utilizadas en áreas que no cuentan con redes de acueducto o en aquellas donde la continuidad del servicio no es muy buena” (p.2).

Forma de cálculo: La cobertura de agua es calculada por la Superservicios a partir del registro del número de suscriptores residenciales y número total de predios residenciales, reportado por las empresas prestadoras de este servicio en cada municipio. Matemáticamente, la forma de cálculo es:

$$CA = \frac{\sum PR}{\sum TPR} \times 100$$

Donde:

CA: Cobertura del servicio de acueducto

PR: Predios residenciales con servicio de acueducto

TPR: Total de predios residenciales

Fuente: Superservicios a partir del “Reporte de estratificación y coberturas”, dispuesto en el Sistema Único de Información del módulo alcaldes.

Unidad de medida: Porcentaje (%).

Justificación: El acceso sostenible a métodos de abastecimiento de agua adecuados es necesario para la vida, la salud y el desarrollo de los sistemas sociales y económicos de todo territorio. Al respecto, el Artículo 365 de la Constitución Política de Colombia señala que, “los servicios públicos son inherentes a la finalidad social del Estado. Es deber del Estado asegurar su prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional”. Por obvias razones, a medida que un mayor número de usuarios tengan acceso al recurso, se aumentará el consumo total.

h. Cobertura de alcantarillado (C_{OBA_t})

“Es el porcentaje del total de población de una unidad espacial de referencia j , que tiene acceso a métodos de saneamiento adecuados, en el tiempo t . (DANE, 2013)”.

De acuerdo al DANE, los métodos “adecuados” están definidos como:

“métodos de disposición y de eliminación apropiada de excretas (higiénica y salubre), que corresponde a la conexión de los inodoros a las redes de alcantarillado públicas y en aquellas zonas rurales, en las que no se tiene acceso a las redes de alcantarillado, las alternativa consideradas como adecuadas son inodoro conectado a un pozo séptico y letrina” (2013, p.1).

Indicador: Cobertura de alcantarillado.

Forma de cálculo: $(\text{Número de personas con acceso al método de saneamiento adecuado } i, \text{ en la unidad espacial de referencia } j, \text{ en el tiempo } t / \text{Población total de la unidad espacial de referencia } j, \text{ en el tiempo } t) \times 100$

Fuente: DANE. **Unidad de medida:** Porcentaje (%).

Justificación: Es un indicador de salud, higiene y calidad de vida de la ciudad (BID, 2013, p.55), pues da cuenta de las condiciones de salubridad del territorio. La Organización de las Naciones Unidas establece el saneamiento básico como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

i. Densidad poblacional (D_{POBt})

Se define como el número de habitantes por kilómetro cuadrado en un territorio y tiempo determinado.

Indicador: Densidad poblacional en área urbana, referida al número de habitantes por kilómetro cuadrado del área urbana del municipio.

Forma de cálculo Con base en la cartografía del Plan de Ordenamiento Territorial vigente, se obtiene el área urbana, definida como “las áreas del territorio distrital o municipal destinadas a usos urbanos por el POT, que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, posibilitándose su urbanización y edificación, según sea el caso” (Artículo 31, Ley 388 de 1997). Por su parte, el número de habitantes urbanos se obtiene de las proyecciones poblacionales del DANE. La forma de cálculo de indicador es:
Población / Área.

Fuente: DANE y Plan de Ordenamiento Territorial vigente.

Unidad de medida: Número de habitantes por kilómetro cuadrado (km^2).

Justificación: Las mayores presiones por abastecimiento de agua y saneamiento, así como los factores que afectan las condiciones ambientales y calidad del recurso, suelen generarse de zonas con alta densidad poblacional. Si bien, “la mayor densidad poblacional puede permitir que las comunidades inviertan con mayor eficacia en función de costo en el ordenamiento de los recursos hídricos; también es cierto que la población de la ciudad tiende

a consumir más agua que los residentes de áreas rurales” (Roudi-Fahimi, Creel, Mark, 2002, p.3), situación que incide en el balance entre la demanda y la oferta hídrica en el ecosistema urbano.

j. Vertimientos (V_{ERTi})

La palabra vertimiento proviene del verbo *verter*, el cual, significa derramar o vaciar líquidos (RAE, 2016). Algunos autores lo definen como las aguas residuales que contienen material suspendido y componentes disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos” (Metcalf y Eddy, 2003, citado por Silva, Torres y Madera, 2008, p. 352). En Colombia, el Decreto 1594 de 1984, describe que el vertimiento es cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o un alcantarillado, además, establece que son las autoridades ambientales quienes tienen la obligación de ejercer control sobre los vertimientos.

“Los constituyentes convencionales presentes en aguas residuales domésticas son: sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica e inorgánica medida como demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniaco, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus” (Metcalf y Eddy, 2003, citado por Silva, Torres y Madera, 2008, p. 352).

Indicador: Aguas residuales urbanas, entendido como “las aguas utilizadas procedentes de viviendas, instalaciones comerciales, de servicios, industriales, sanitarias, que se vierten al sistema de alcantarillado” (ACUACAR, s.f.).

Forma de cálculo: La empresa ACUACAR contabiliza el caudal (litros por segundo) promedio mensual de agua residual entregada por los diferentes sectores al sistema de

alcantarillado de la ciudad. Para efectos de medición se puede convertir el caudal L/seg a metros cúbicos (m^3), en diferentes periodos que se requiera (mensual, semestral, anual, etc.).

Fuente: Aguas de Cartagena. **Unidad de medida:** Metros cúbicos (m^3).

Comentarios finales

La ciudad es un ecosistema artificial anidado a ecosistemas más amplios. Se caracteriza por ser un sistema abierto y dinámico que consume, transforma y libera materiales y energía por medio de múltiples flujos con su entorno. Las ciudades tienen su propio metabolismo, entendido como la suma total de procesos socioeconómicos de consumo de recursos y generación de residuos que ocurren a través de la apropiación, transformación, circulación, secreción, emisiones y uso de los recursos propios y del entorno, que en su conjunto, representa el metabolismo urbano. Éste consta de tres procesos: 1) Entradas o inputs, 2) Transformación y 3) Salidas (outputs).

El análisis del metabolismo urbano se puede realizar sobre el conjunto de flujos de materia y energía presentes en una ciudad o sobre un solo material. En el caso particular del metabolismo urbano del agua potable, el **Input** está representado por la operación de *apropiación* que implica *absorción (captación)* del agua cruda por medio de una estructura disipativa (el acueducto), así como su *utilización representada en el consumo del agua potable*. Estas operaciones están en función de la demanda de bienes y servicios en la ciudad que depende del precio de bien (P_x), el ingreso (I), los gustos del consumidor (G) (Teoría de Marshall) y la restricción presupuestal (Teoría del Consumidor); sin embargo, el agua es un bien de primera necesidad, de modo que, la variación del ingreso del individuo poco afectará

su demanda. También, el agua es consumida en los hogares en conexión con diferentes tareas o consumo de bienes finales.

Entretanto, el proceso de **transformación** del agua, va acompañado de la circulación de este material hacia las entradas (potabilización para el consumo al menor costo unitario y en las cantidades que pueden vender en el mercado.) y las salidas del sistema (aguas residuales). De acuerdo con la Teoría de producción, la cantidad de agua *transformada como bien apto para el consumo (input)* depende de la disponibilidad y precio de los factores productivos (acceso a fuentes de agua, sistemas de explotación y distribución del recurso, topografía, etc.), el número de oferentes y los avances tecnológicos en el proceso de potabilización y distribución que permiten a la empresa tener mayor eficiencia en el uso de sus factores de producción.

Por su parte, las aguas residuales en diferentes cantidades y cargas contaminantes representan las *salidas (output)* del metabolismo del agua potable. Éstas dependen de la cantidad de agua consumida por la población y la manera como es utilizada en la producción de bienes y servicios. Estos son flujos desde la economía hacia el medio ambiente, se caracterizan por no estar disponibles para biodegradación por saturación de sustancias que no se metabolizan, lo que rompe con el proceso metabólico y genera contaminación.

En este orden de ideas, el Input del proceso (Consumo de agua residencial) está afectado por ingreso, precio del agua potable, temperatura, precipitación, nivel de urbanización, cobertura de acueducto; mientras que, el output (vertimientos) dependerán de la cantidad de agua consumida en cada uno de los sectores, cobertura de alcantarillado, precipitación, densidad poblacional urbana y las tarifa ambiental por vertimientos.

Capítulo 3.

Análisis de caso

Teniendo en cuenta la fundamentación conceptual realizada en los capítulos anteriores, se realiza la caracterización de la ciudad de Cartagena de Indias en términos de los componentes ambientales, área urbana y rural, dinámica demográfica y aspectos sociales y económicos. Luego, se realiza una aproximación al metabolismo urbano del agua potable de la ciudad a través de la identificación de los factores que afectan el consumo del agua residencial y sus aguas servidas.

3.1. Caracterización de Cartagena de Indias, Capital de Bolívar

Cartagena de Indias, fundada en 1533 por Pedro de Heredia (Segovia, 2001), fue una de las Colonias españolas en el Caribe colombiano. La construcción de fortalezas y sus características naturales la consolidaron desde aquella época, como puerto clave en la ruta de los galeones de España (Abello, Novoa, Balseiro, 2006, p.6), llegando a ser dos siglos después de su fundación, el segundo centro urbano del Virreinato de la Nueva Granada con una población de 13.690 personas¹⁴ (Meisel, Aguilera, 2009). Para el año 2014 la ciudad cuenta 990.179 habitantes, es decir, que en esos 237 años se multiplicó por 72,3 el número de personas de la ciudad.

En términos de área, en el año 2014, Cartagena de Indias es la quinta capital más extensa de la región Caribe con 567 km², cifra que equivale al 2,1% del área del departamento de Bolívar; la cuarta parte de la ciudad de Santa Marta (2.347 km²) y cerca de cuatro veces el

¹⁴Población del año 1777.

tamaño de Barranquilla sin contar su área metropolitana (155 km²).¹⁵ La ciudad se divide en 3 localidades (Histórica y del Caribe Norte, la Virgen y Turística, y la Industrial de la Bahía),¹⁶ 15 unidades comuneras de gobierno, 187 barrios (Plan 4C, 2014, p.28) y 15 corregimientos.¹⁷

3.1.1. Componentes ambientales

“El territorio Distrital está compuesto por una serie de islas, penínsulas y cuerpos interiores de agua, que conforman el área insular y un área continental. Estas condiciones y la presencia de los cuerpos de agua hacen de Cartagena una ciudad con características morfológicas especiales y un hermoso paisaje natural pero al mismo tiempo lo constituyen en un sistema de gran fragilidad ambiental.” (POT, 2001-2009, p.4).

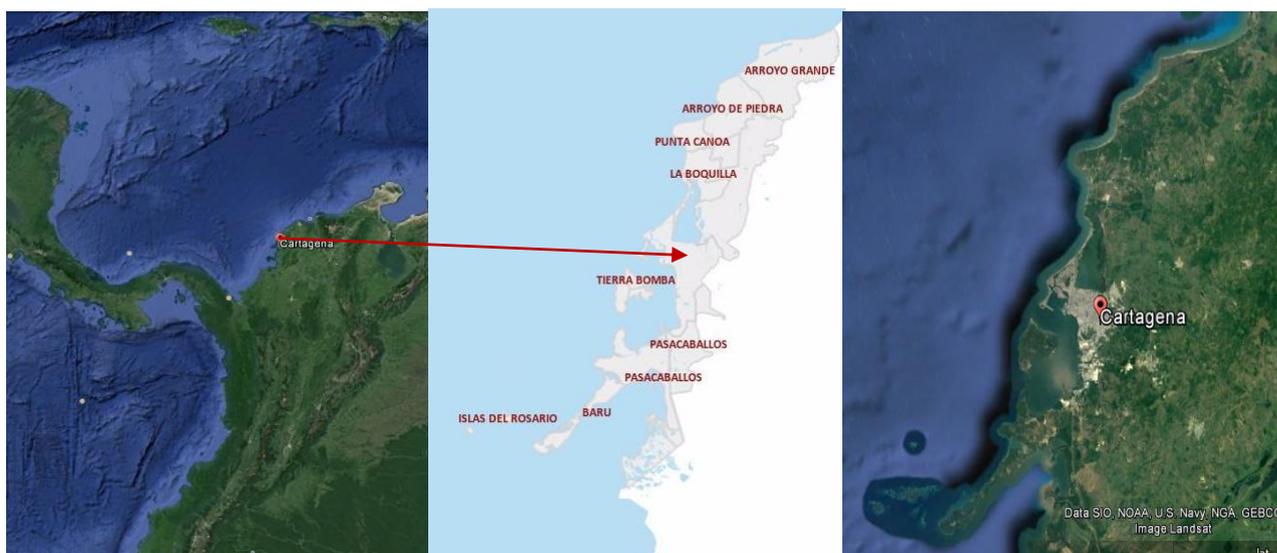
En otras palabras, de acuerdo al POT, el agua es el paisaje diverso y estratégico de Cartagena conformado por el Mar Caribe que bordea parte de la ciudad, la Bahía de Cartagena, la Bahía de Barbacoas, la Ciénaga de La Virgen, el Parque Natural Corales del Rosario e islas de San Bernardo, el acuífero de Arroyo Grande y el Canal del Dique que abastece de agua a la ciudad. En la tabla 2 se describen cada uno de estos cuerpos de agua.

¹⁵Cifras del IGAC.

¹⁶Ley 768 de 2002.

¹⁷ Son 15 los corregimientos de Cartagena según Acuerdo 19 de 1997: Arroyo Grande, Arroyo de Piedra, Punta Canoa, Pontezuela, Bayunca, La Boquilla, Tierrabomba, Caño del Oro, Bocachica, Pasacaballos, Santa Ana, Barú, Islas del Rosario, Archipiélago de San Bernardo, Isla Fuerte.

Figura 6. Localización de Cartagena de Indias



Fuente: <http://midas.cartagena.gov.co> y Google Earth.

Tabla 2. Cuerpos de agua de Cartagena de Indias

Cuerpo de agua	Localización	Descripción	Estado
Bahía de Cartagena		Superficie: 82 km ² , profundidad promedio: 16m. Es el principal cuerpo de agua del sistema hídrico de Cartagena. Parte central del Caribe entre al altitud 10°20' - 10°16'N y longitud 75°30' - 75°36', enmarcada en la fleca de Bocagrande, la isla de Tierrabomba, el continente, el Bajo de Isla Fuerte y la Isla de Barú.	Hasta el 2012, recibía cerca del 90% de los desechos industriales y domésticos de Cartagena, además de los sedimentos y contaminantes transportados por el Canal del Dique y la actividad marítima y portuaria. El POT vigente lo propone como área de recuperación ambiental.
Ciénaga de la virgen		Tienen forma de pera, estrecha al norte y amplía al sur, con anchura máxima de 4,5 km y longitud de 7 km, un espejo de agua de unos 22,5 km ² y profundidad de hasta 1,6 m. Localizado en Costado norte de Cartagena y separada del mar por el cordón de arenas de la Boquilla.	Hasta el año 2012, era un punto de vertimiento de aguas residuales de Cartagena. Según Aguas de Cartagena, en 2004, recibía cerca de 88.000 m ³ /d de aguas residuales.
Mar Caribe		La zona costera presenta su mayor ancho en el área urbana (17 km) y en la zona norte en el sector Punta Canoas-Bayunca y zona más angosta, de menos de 1 km, entre los caños de Matunilla y Lequerica en la Bahía Barbacoas. Gran parte de la zona costera está conformada por costas de topografía baja, formadas por acumulación de sedimentos.	Algunos investigadores consideran que los procesos de erosión y sedimentación del litoral de Cartagena podrían ser el resultado de fenómenos tectónicos asociados al diapirismo de lodos, estando la erosión de la línea de la costa asociada a procesos de hundimiento de subsuelo.

Cuerpo de agua	Localización	Descripción	Estado
Canal del Dique		Brazo artificial del Río Magdalena. El Canal desemboca en la Bahía de Cartagena por Pasacaballos, en la Bahía de Barbacoas por los caños Lequerica y Matunilla y en el mar Caribe a través de la boca del Caño Corra e 40 km de longitud. Desde 1934 se han realizado tres rectificaciones, la última dejó el Canal con una longitud de 115 km, un ancho en el fondo de 65m y profundidad mínima de 2,50m. El área de drenaje es de 4.400 km ² . Para su manejo, se subdivide en tres sectores: Alto, Medio y Bajo. Es la fuente de provisión de agua de Cartagena y las poblaciones aledañas al Canal del Dique, además, cuenta con potencial para el transporte fluvial.	
Bahía de Barbacoa		Se considera como parte del ecosistema del Canal del Dique. Se extiende desde punta Barbacoas hasta Punta Platanal (Barú) y salida del Caño estero con un área aproximada de 131,25 km ² .	N.D.
Laguna de San Lázaro		Tiene un área aproximada de 13,7 Ha y una Profundidad promedio de 1,5m. Limita al sureste con el barrio Manga, al oeste con la Laguna de San Lázaro, al norte con el barrio El Espinal, al este con Pie de la Popa y al sur con la Bahía Cartagena.	N.D.
Ciénaga de las Quintas		Tiene un área aproximada del 52,3 Ha y una profundidad promedio de 1,5m. Limita al Sureste con el barrio Manga, al oeste con la laguna de San Lázaro, al norte con el barrio el Espinal, al este con Pie de la Popa y al sur con la Bahía de Cartagena.	N.D.
Caño el Zapatero		Separa la Isla de Manzanillo del mar de la parte continental de la ciudad de Cartagena.	N.D.
Cuerpo de Agua de la zona sur		En la zona sur del Distrito de Cartagena existen numerosos cuerpos de agua entre los que se destacan: Ciénaga Honda, Ciénaga Coquito, Ciénaga Vásquez, Ciénaga Portinaito, Caño Lequerica, Bahía de Barbacoas, Ciénaga Matunilla, Ciénaga Lebranche, Ciénaga Flamenquito, Ciénaga el Mohan, Ciénaga de Pozo de Barú, entre otros. De estos cuerpos de agua existe muy poca información.	En cuanto a sus condiciones ambientales, sin embargo, durante la visita de campo de inspección visual, realizada en 2010 por el equipo de la Universidad de Cartagena, no detectaron contaminación de estos cuerpos de agua.

Fuente: El autor con base en el “Diagnóstico del Distrito de Cartagena en materia de Ordenamiento Territorial - Prediagnóstico componente ambiental”, elaborado por la Universidad de Cartagena, 2010.

En la ciudad, también sobresale la formación de **La Popa**, “compuesta por rocas y corales, se presenta en forma de colina alargadas, pendientes fuertes y medias donde se encuentran abanicos aluviales, cárcavas, escarpes y acantilados” (Centro de Investigaciones Oceanográficas en Hidrográficas -CIOH, 2010). Esta zona se caracteriza por albergar a la población más pobre de la ciudad que invaden el sector, alejada de las rutas de transporte y en

terrenos vulnerables a condiciones ambientales adversas, tales como la deforestación (Salazar y Pérez, 2007).

Características geoclimáticas

La capital de Bolívar tiene un clima cálido con una temperatura media de 28,2°C; una temperatura máxima anual de 31°C a 32,7°C entre los meses de junio y septiembre; y, mínimos valores entre los meses de enero a marzo, con promedios entre 26,5°C y 27,1°C.¹⁸ En promedio, recibe durante el año 988,5 mm de lluvia y varía desde los 34 mm en los primeros meses del año hasta los 279 mm entre agosto y octubre, meses en los que se registran los mayores valores. De acuerdo a la Universidad de Cartagena (2010), el clima de la ciudad se puede clasificar como tropical semiárido, con dos periodos climáticos principales: Época seca (diciembre a marzo) y época húmeda (abril a junio), influenciadas por la posición geográfica de Cartagena en el área sureste del Caribe (CIOH, 2010), los vientos alisios y el Cinturón de Convergencia Intertropical.

3.1.2. Área urbana y rural

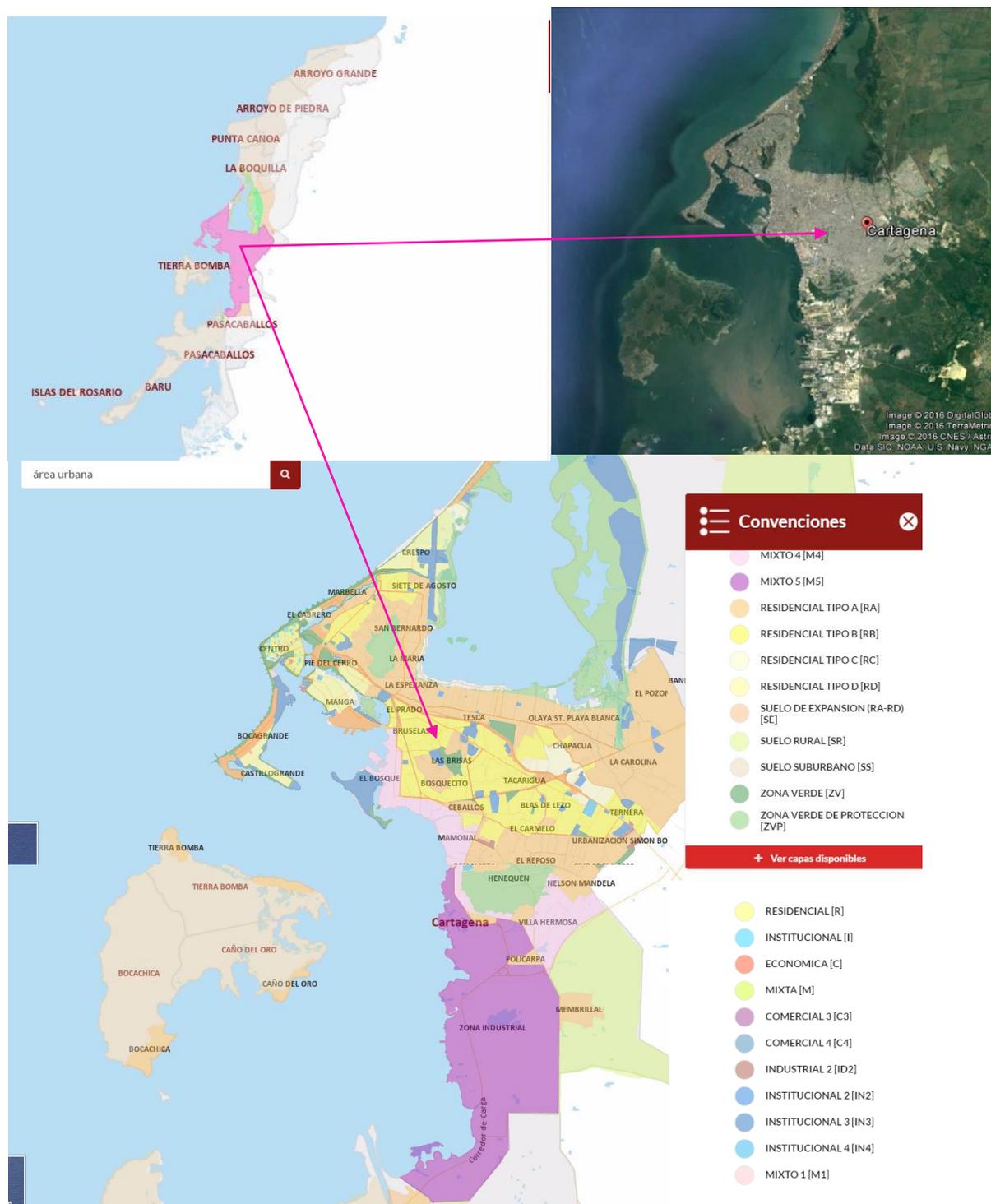
En el año 2012, de acuerdo al IGAC, de los 567 km² que conforman el Distrito de Cartagena, solo el 13% (75,87 km²) del territorio es área urbana, cifra que equivale a 2,8 veces el área continental de la Isla de San Andrés (27 km²). Cerca del 87% del territorio es rural (Plan 4C, 2014), lo que representa importantes posibilidades de expansión urbana con la debida planeación y gestión del crecimiento de la ciudad.

¹⁸Cifras del IDEAM, año 2012.

De acuerdo a la Ley 388 de 1997, el suelo urbano está constituido por las áreas del territorio “destinadas a usos urbanos por el Plan de Ordenamiento que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, posibilitándose su urbanización y edificación, según sea el caso” (Artículo 31).¹⁹ En el marco de esta Ley, el POT vigente de Cartagena señala que los usos del suelo urbano son de tipo residencial, comercial, industrial, institucional y mixto, siendo predominante el uso residencial (Ilustración 7). Es importante mencionar que, cerca del 15% del territorio de Cartagena son rellenos hechos en las llanuras intermareales para ganarle terrenos a la Ciénaga y a la Bahía a fin de generar tierras para la industria y la vivienda (Universidad de Cartagena, 2010).

¹⁹Es importante tener en cuenta que, según esta Ley, en ningún caso el perímetro urbano será mayor que el perímetro de servicios públicos o sanitarios.

Figura 7. Clasificación del suelo en Cartagena de Indias



Fuente: <http://midas.cartagena.gov.co/>. Consultado el 14 de noviembre de 2016.

En lo que al **suelo rural** se refiere, el POT vigente los clasifica en: a) **Suelo rural de los centros poblados**, b) **Suelos suburbanos**, definidos por La Ley 388 de 1997 como aquellos

“en los que se mezclan los usos del suelo y las formas de vida de campo y la ciudad, diferentes a las clasificadas como áreas de expansión urbana” (Artículo 34 de la Ley 388 de 1997). Están ubicados en la zona Norte y en los territorios insulares (Barú, Tierra Bomba e Islas del Rosario); y, c) “**Suelos rurales no aptos para usos urbanos** por su destinación a uso agrícola, ganadero, forestal y explotación de recursos naturales; se caracterizan por estar dispersos, sin continuidad y segmentados” (POT Componente rural, 2001-2009, p.8). Para su análisis, el POT vigente clasifica los suelos rurales, en cinco ámbitos geográficos:

“**1) Ámbito Zona Norte.** El uso característico son actividades agrícolas y ganaderas; sin embargo, se pueden desarrollar actividades diferentes que sean compatibles con las normas ambientales pertinentes. **2) Ámbito de las Ciénaga de La Virgen,** corresponden a la franja que limita entre el borde de la zona de expansión y la vía de la cordialidad ubicados dentro de la cuenca de las corrientes que vierten a la Ciénaga. Son suelos esencialmente para dedicación agrícola, ganadera y pecuaria, en los que se prevé el desarrollo de vivienda campestre, recreacional y de agroturismo. **3) Ámbito de la Bahía de Cartagena,** comprende el área que va desde la divisoria de aguas del Cerro de la Popa hasta la Punta de Barú; incluye las islas de Tierra Bomba y de Barú. Son los suelos rurales que se encuentran en límites con los municipios de Turbaco y Turbana, prioritarios para la producción agrícola, ganadera y pecuaria tradicional. Otros usos previstos son vivienda campestre y producción de alimentos (agroindustria). **4) Ámbito Barbacoas** con vocación para la producción camaronera. **5) Territorio Insular,** se encuentra ubicado en los linderos el Parque Nacional Natural Los Corales del Rosario y está sometido a regulación del Ministerio del Medio Ambiente, por lo que no se prevé desarrollos nuevos en estas islas. (2001, p.5, 6).

Sobre esta base natural, se desarrollan las diferentes actividades económicas de la ciudad, caracterizadas por aprovechar las ventajas comparativas que ofrecen la ubicación geográfica y estructura ecológica de la capital de Bolívar, tal y como se describe a continuación.

3.1.3. Condiciones económicas y sociales

3.1.3.1. Principales actividades económicas

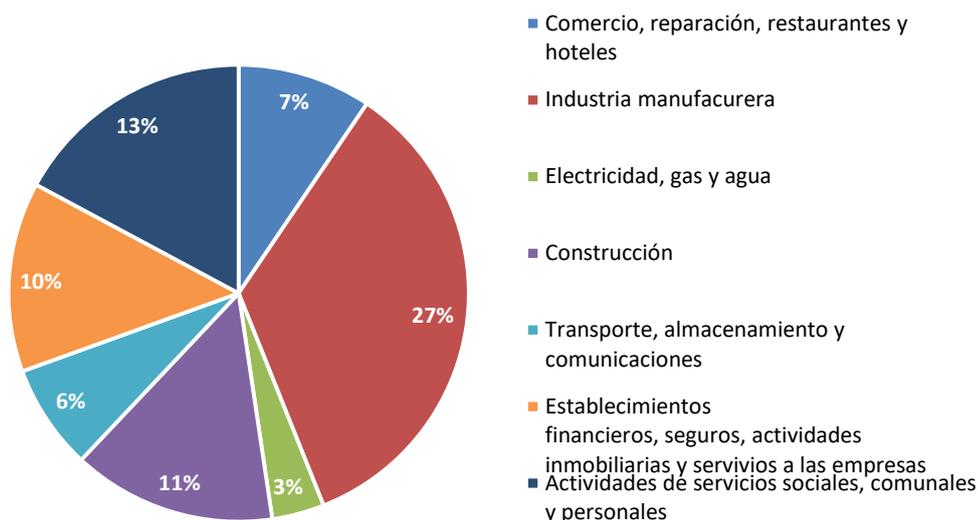
Las principales actividades económicas de la ciudad son la industria manufacturera, el movimiento portuario, los servicios turísticos, el comercio y la construcción. Muestra de ello, son los resultados del cálculo aproximado del Producto Interno Bruto de Cartagena²⁰ para el año 2013, en el cual, la **Industria manufacturera** representa el 27% del PIB (8.048 miles de millones) generado principalmente por la industria petroquímica que cuenta con la refinería más importante del país, además, el sector se caracteriza por la alta concentración de bienes intermedios y ser altamente exportador (Universidad de Cartagena, 2010). Le sigue las **actividades de servicios sociales y comunales** (13%; 3.986 miles de millones) referidas al “empleo, oficio o actividad que se realiza en favor de personas o comunidades donde se entrega un bien intangible sobre el cual se adquiere derechos de pertenencia” (DANE, 2007, p. 22), entre ellos, salud, educación (privada o pública), administración pública.

Otros sectores con importante participación en el PIB son **Construcción** (11%; 3.337 miles de millones) y **Comercio, reparación, restaurantes y hoteles** (7%; 2.192 miles de millones), este último impulsado por el crecimiento del turismo como resultado de “los atractivos naturales, patrimoniales y culturales, así como las alianzas realizadas con ciudades

²⁰ En Colombia, los cálculos del PIB solo se realiza a nivel de departamento y nacional. Por ello, para el PIB de la ciudad se utiliza como proxy el PIB del departamento restando dos componentes: 1) el sector primario, partiendo del supuesto que todas las actividades de este sector se realizan por fuera de la ciudad y, 2) la parte del sector terciario considerando parámetros poblacionales de los municipios de Bolívar con mayor actividad en el sector terciario (Arjona, El Carmen de Bolívar, María la baja, Magangué, Mompo y Turbaco. En este sentido, “la participación de cada entidad territorial de este PIB se desprende de la distribución poblacional en ese grupo por tanto, Cartagena aportaría el 67% al sector terciario y le resto de municipios un 33% (Abello, Novoa, Balseiro, 2006). Se presenta este ejercicio como un cálculo que permite aproximarse al PIB de la ciudad, sin mayores pretensiones de establecer formas de mediciones del PIB.

en el resto del mundo en el marco de las promociones del Distrito en eventos mundiales, el desarrollo logístico y de tecnologías para la organización de eventos” (Universidad de Cartagena, 2010, p.97).

Gráfico 4. PIB Cartagena 2013 (proxy) con base en el PIB departamental



Fuente: El autor con base en las cuentas nacionales del DANE.

En general, entre 2000 y 2013, el PIB de Cartagena creció un 12% promedio anual, cifra superior al incremento del PIB Nacional (10%). El sector económico con mayor crecimiento es el de la Construcción, con un aumento del 22% promedio anual en el periodo en mención, le sigue el sector Industria manufacturera con un 14% y el sector Transporte, almacenamiento y comunicaciones con 11%. Sin embargo, de acuerdo al estudio “Caracterización del comercio de Cartagena y Bolívar, 2000-2014”, el sector que más empleo formal generó en ese último año fue el relacionado con la actividad turística (hoteles y restaurantes) con un 30%, seguido de servicios comunales, sociales y personales (22%) (Aguilera, et al, 2015).

3.1.3.2.Mercado laboral

Si se analiza los indicadores de mercado laboral del periodo comprendido entre 2001 y 2014, se encuentra que la tasa de ocupados registró un comportamiento al alza, pasando de 46% de la Población en Edad de Trabajar (PET) al 56,5% respectivamente; mientras que, la Tasa de Desempleo (TD) se redujo en un 51%, al pasar de 15,6% en 2001 a 7,8% en 2014. Aun así, según el DANE, en 2014, el 54% de las personas ocupadas lo están en empleos informales; solo el 2,1% tiene un empleador y el 4% son empleados del gobierno, lo que muestra una alta informalidad que afecta los ingresos en los hogares, estabilidad y calidad de vida. En este contexto, es importante considerar que uno de los factores que determinan tanto la oferta laboral como los patrones de consumo y estructura de la ciudad es la dinámica demográfica, razón por la cual a continuación se realiza una breve descripción.

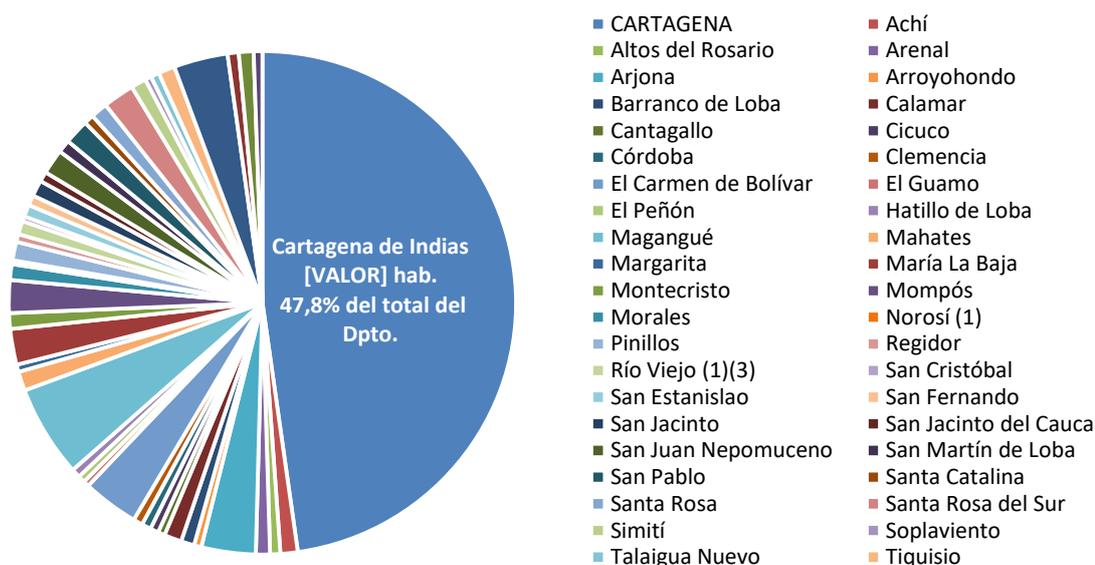
3.1.3.3.Dinámica demográfica

Son tres los aspectos que se describen en este ítem: Densidad, crecimiento y estructura de la población.

Densidad poblacional

En 2015, Cartagena es el municipio más poblado del departamento de Bolívar, con 1.001.755 habitantes en su haber que representan el 47,8% de los habitantes del departamento; y, es cerca de 24 veces la población de Santa Rosa del Sur (42.033), municipio con la mayor extensión territorial de Bolívar (2.383 km²) (Gráfica 5).

Gráfico 5. Población por municipios en el departamento de Bolívar, 2015



Fuente: El autor con base en proyecciones poblacionales del DANE.

En términos de densidad poblacional, Cartagena de Indias es la segunda capital de la región Caribe con la mayor cantidad de habitantes por kilómetro cuadrado (1.767 hab/km² en 2015), después de Barranquilla (7.861 hab/km²)²¹, además, en los últimos diez años, presenta una de las menores tasas de crecimiento promedio anual de la población (1,1%) en la región. Su densidad poblacional muestra lo siguiente:

- Cerca del 96% de la población del municipio habita en el 13,4% del territorio (área urbana); mientras que, en 2015, el 4,2% de la población habita en el área rural.
- La densidad poblacional del área urbana para el año 2015 fue de 12.642 hab/km², la tercera más alta después de Barranquilla (17.364 hab/km²) y Sincelejo (15.336 hab/km²).
- En el ámbito rural, la densidad poblacional se encuentra estancada en torno a 86 habitantes por kilómetro cuadrado.

²¹La cifra no considera el área metropolitana.

- Entre los años 2000 y 2015, Cartagena es la segunda capital de la Región Caribe con mayor población después de Barranquilla y su área, –la quinta más extensa entre las capitales de la región-, es cerca de 4 veces (567 km^2) la de esta ciudad (155 km^2).
- En ese periodo, la densidad poblacional se incrementó en un 18% al pasar de 1.497 habitantes por kilómetro cuadrado en el año 2000, a 1.767 en 2015, como resultado del aumento de la densidad poblacional urbana.²²

Crecimiento poblacional urbano y rural

La gráfica seis muestra que en los últimos quince años, el ritmo de crecimiento promedio anual de la población urbana es superior al rural; manteniéndose relativamente constante en un 1,3%. Asimismo se estima que, en el largo plazo esta tasa podría incrementarse como resultado de los proyectos de expansión urbana que se llevan a cabo en la zona norte de la ciudad; además, es importante tener en cuenta que Cartagena es una de las ciudades del Caribe con significativa recepción de desmovilizados de grupos armados ilegales, lo que podría modificarse en el corto y mediano plazo, si se formalizan los acuerdos de paz con estos grupos y se reduce el número de desplazados por la violencia.

En contraste, el ritmo de crecimiento promedio anual de la población rural de Cartagena registró tasas negativas (Gráfico 6), lo que refleja la reducción de la cantidad absoluta de habitantes del área rural (pasó de 57.708 en 2000 a 42.161 en 2015). Según las proyecciones realizadas por el DANE, se mantendrán las tasas negativas de crecimiento promedio anual de población rural y su concentración será cercana al 4% (40.864 habitantes) en el año 2020.

²²Cálculos propios con base en proyecciones poblacionales del DANE, y cifras de área del IGAC.

Gráfico 6. Dinámica del crecimiento poblacional urbano Vs. Rural

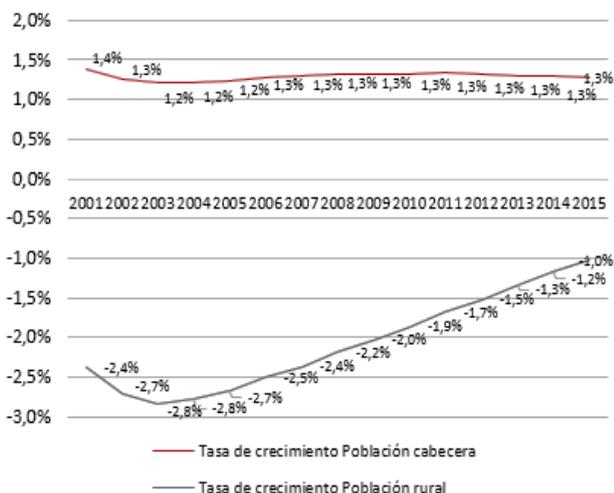
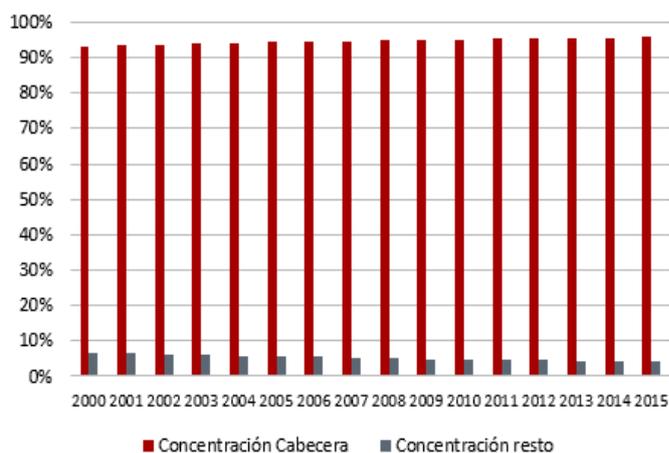


Gráfico 7. Concentración urbana Vs. concentración rural, Cartagena de Indias

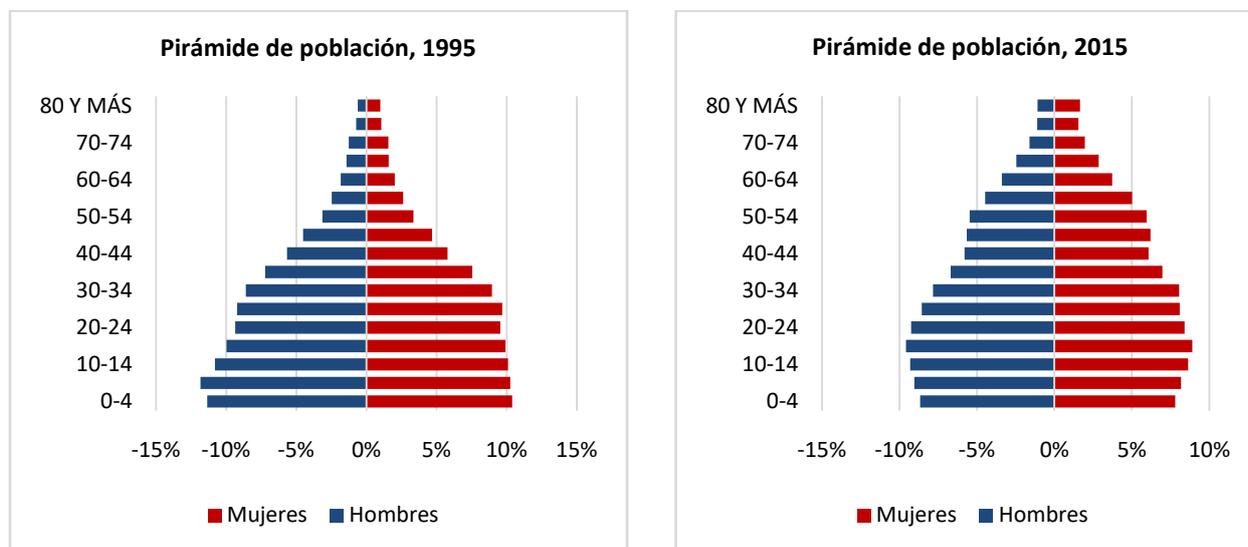


Fuente: El autor con base en proyecciones poblacionales del DANE.

Estructura demográfica

En cuanto a la estructura demográfica, según las proyecciones del DANE, en el año 2015 la distribución por sexo y edad de la ciudad de Cartagena es en su mayoría femenina (52%). La mayor parte de la población del Distrito se encuentra entre 0 y 34 años de edad con una participación de 60,1%. Al comparar este resultado con los datos de 1995, se observa que este mismo grupo de edad concentraba un 69,4% del total de la población de ese año, lo cual significa una disminución significativa en el porcentaje de la población joven (Gráfica 8).

Gráfico 8. Pirámide poblacional Cartagena de Indias, 1995 –2015



Fuente: El autor con base en proyecciones de población del DANE.

3.1.3.4. Pobreza

En el año 2014, el 40,8%, (343.527) de la población urbana de Cartagena vive en condiciones de pobreza de acuerdo al Índice de Pobreza Multidimensional (IPM), calculado por el Departamento Nacional de Planeación. La situación empeora al analizar la pobreza en áreas rurales: el 72% de la población es pobre según el IPM, cifra superior en 32,5 puntos porcentuales a la pobreza en área urbana.

Las principales privaciones de la población pobre de la capital de Bolívar, tanto en área urbana como rural, son en su orden, empleo formal con un 90,78% de informalidad laboral, bajo logro educativo (52,42%), alta tasa de dependencia económica (49,91%), hogares sin aseguramiento de salud (33,43%), rezago escolar (26,22%) y condiciones de hacinamiento (26,63%). En contraste, el acceso de los hogares a fuentes de agua mejorada y el trabajo

infantil son los temas en su mayoría superados en la ciudad de acuerdo a la medición del IPM (9,85% y 2% de hogares con privaciones, respectivamente).

Tabla 3. Pobreza Multidimensional por componentes, Cartagena de Indias, 2014

Componente/ Dimensión	Variable		Privación municipal por componente (% de hogares)
	Privación*	Indicador	
Condiciones educativas del hogar (0.2)	Bajo logro educativo (0.1)	Escolaridad promedio de las personas de 15 años y más del hogar.	49,88%
	Analfabetismo (0.1)	Porcentaje de personas del hogar de 15 años y más que saben leer y escribir.	16,51%
Condiciones de la niñez y juventud (0.2)	Inasistencia escolar (0.05)	Proporción de niños entre 6 y 16 años en el hogar que asisten al colegio.	6,56%
	Rezago escolar (0.05)	Proporción de niños y jóvenes (7-17 años) dentro del hogar <u>sin</u> rezago escolar (según la norma nacional).	26,22%
	Barreras de acceso a servicios para el cuidado de la primera infancia (0.05)	Proporción de niños de cero a cinco años en el hogar con acceso simultáneo a salud, nutrición ¹ y educación inicial. ²	13,75%
	Trabajo infantil (0.05)	Proporción de niños entre 12 y 17 años en el hogar que se encuentra por fuera del mercado laboral.	2%
Trabajo (0.2)	Tasa de dependencia económica (0.1)	Número de personas por miembro ocupado en el hogar.	49,91%
	Empleo informal (0.1)	Proporción de la PEA del hogar que son ocupados con afiliación a pensiones (proxy de informalidad).	90,78%
Salud (0.2)	Sin aseguramiento en salud (0.1)	Proporción de miembros del hogar, mayores de cinco años, asegurados a Seguridad Social en Salud.	33,43%
	Barreras de acceso a servicio de salud (0.1)	Proporción de personas del hogar que acceden a servicio institucional de salud ante una necesidad sentida en los últimos 12 meses.	3,23%
Acceso a servicios públicos domiciliarios y condiciones de la vivienda (0.2)	Sin acceso a fuente de agua mejorada (0.04)	Hogar urbano: se considera como privado si no tiene servicio público de acueducto en la vivienda. Hogar rural: privado cuando obtiene el agua para preparar los alimentos de pozo con o sin bomba, agua lluvia, río, manantial, carro tanque, aguatero u otra fuente.	9,85%
	Inadecuada eliminación de excretas (0.04)	Hogar urbano: se considera como privado si no tiene servicio público de alcantarillado. Hogar rural: inodoro sin conexión, letrina, bajamar o no tiene servicio sanitario.	19,57%

Componente/	Variable		Privación
	Pisos inadecuados (0.04)	Se consideran en privación los hogares que tienen pisos en tierra.	9,52%
	Paredes exteriores inadecuadas (0.04)	Hogar urbano: si el material de las paredes exteriores es madera burda, tabla, tablón, guadua, otro vegetal, zinc, tela, cartón, desechos o sin paredes. Hogar rural: i el material es guadua, otro vegetal, zinc, tela, cartón, desechos o sin paredes.	7,73%
	Hacinamiento crítico (0.04)	Número de personas por cuarto para dormir excluyendo cocina, baño y garaje e incluyendo sala y comedor.	26,63%

*Los números entre paréntesis son los pesos relativos del componente en el cálculo del IPM total.

Fuente: El autor con base en el IPM del DNP.

3.1.3.5. Educación

En el año 2014, solo el 79% de la población en edad escolar (5-17 años) cuenta con acceso a educación básica primaria y secundaria; además, persiste el déficit de 53% en la cobertura neta de educación media necesaria para la formación para el trabajo y profesional.²³ Entretanto, el 4% del total de estudiantes, tanto de área urbana como rural, abandonaron el sistema escolar, registrando las mayores tasas de deserción los niveles de educación media (4,84%) y preescolar (4,59%).²⁴

En materia de calidad, “el 65% de las Instituciones Educativas (IE) de Cartagena obtuvieron una calificación entre C y D en 2014, es decir, en los rangos más bajos; mientras que, ninguna de las IE oficiales alcanzó el nivel A+ y el 82% no supera el nivel C” (Cartagena Cómo Vamos, 2014, p. 23). Esta situación es una barrera para el acceso de la población pobre a la educación superior oficial.

²³Estadísticas del Ministerio de Educación Nacional.

²⁴Estadísticas de la Secretaría de Educación Distrital.

Por su parte, Cartagena cuenta con 13 Instituciones de Educación Superior (IES) según el Ministerio de Educación Nacional, las cuales atienden parte de la demanda de la región Caribe. De los programas de educación superior ofrecidos, el 35% pertenecen principalmente al área de economía, administración, contaduría y afines, seguido por un 27% en programas del área de ingeniería y arquitectura, y un 15% en las áreas de las ciencias sociales. Las ciencias de la salud tienen una participación del 10% en el total de los programas de educación superior ofertados en la ciudad.

3.1.3.6. Salud

De acuerdo al Ministerio de Salud y Protección Social, la cobertura total en salud (régimen contributivo y subsidiado) en Cartagena, al finalizar el año 2014, fue del 100%, luego de una tendencia creciente en el número de cupos, especialmente del régimen subsidiado. En cuanto a las Instituciones Prestadoras de Salud (IPS), 30 (65% del total) se concentran en la Localidad Histórica y del Caribe Norte, 9 (20%) en la Localidad Industrial y de la Bahía y, 7 (15%) en la Localidad de la Virgen y Turística (Universidad de Cartagena, 2010).

3.1.3.7. Servicios públicos domiciliarios

Energía eléctrica y gas

El servicio de energía eléctrica es distribuido y comercializado por la Sociedad Electrificadora del Caribe (Electricaribe), empresa privada que en la actualidad proporciona coberturas del servicio cercanas al 100%, tanto en áreas urbanas como rurales del Distrito. Sin embargo, de acuerdo a Cartagena Cómo Vamos, en el año 2014, en promedio cada

habitante de la ciudad estuvo 28 horas sin el servicio de energía eléctrica. En el año 2016, la Superservicios intervino Electricaribe debido a las deudas de la empresa con los generadores de energía, lo que podría generar racionamientos del servicio en toda la región Caribe colombiana.

Por su parte, el servicio público de gas domiciliario es prestado por la empresa Surtigas S.A. E.S.P, alcanzando en el 2014 una cobertura de 99% de los hogares en Cartagena, sin registrar interrupciones o problemas en la prestación del servicio, de acuerdo a reportes de Cartagena Cómo Vamos.

Sistema de acueducto

El servicio de agua potable y alcantarillado en Cartagena de Indias es prestado por Aguas de Cartagena S.A. E.S.P (ACUACAR), empresa de servicios públicos mixta encargada del proceso de potabilización del agua desde el año 1995. Está conformada por varios grupos accionarios: El Distrito de Cartagena de indias (50%), Grupo AGBAR (45,9%) socio operador de Barcelona, entre otros accionistas privados (41%). De acuerdo al Reporte de sostenibilidad de 2015 de Aguas de Cartagena, la empresa atiende cerca de 251.246 usuarios de acueducto y 235.376 de alcantarillado, con una cobertura de 99,9% y 93,6%, respectivamente; además, presenta una continuidad de 24 horas en las prestación del servicio y sin riesgo para el consumo humano, según el IRCA calculado en 2014 por Instituto Nacional de Salud Pública.

Ruta Metabólica del agua potable del sector doméstico

Input –Flujo de entrada

La Ruta metabólica inicia con la captación de agua cruda²⁵ en el Canal del Dique, “el cual tiene un caudal medio de 450 m³/seg, lo que asegura una oferta suficiente para el requerimiento que es de aproximadamente 2,5 m³/seg en el año 2008” (Álvarez y Ruiz, 2008). Este Canal es “una vía de comunicación fluvial de 113 kilómetros desde Calamar hasta la Bahía de Cartagena, construido en el siglo XVI para facilitar la navegación entre Cartagena de Indias y el río Magdalena, importante arteria fluvial que fluye del sur al norte del país (Aguilera, 2006). “Los principales ecosistemas de la cuenca son los humedales, no sólo en términos de área total que abarcan, sino también por su riqueza natural y por los bienes y servicios que prestan a los pobladores de la cuenca, especialmente, en términos de recursos hídricos para consumo humano y agropecuario, así como el transporte fluvial” (Universidad de Cartagena, 2010, p.19).

Figura 8. Canal del Dique



Fuente: Aguas de Cartagena, 2015.

²⁵ Aguas que debe ser tratada para que sea apta para el consumo humano (potable).

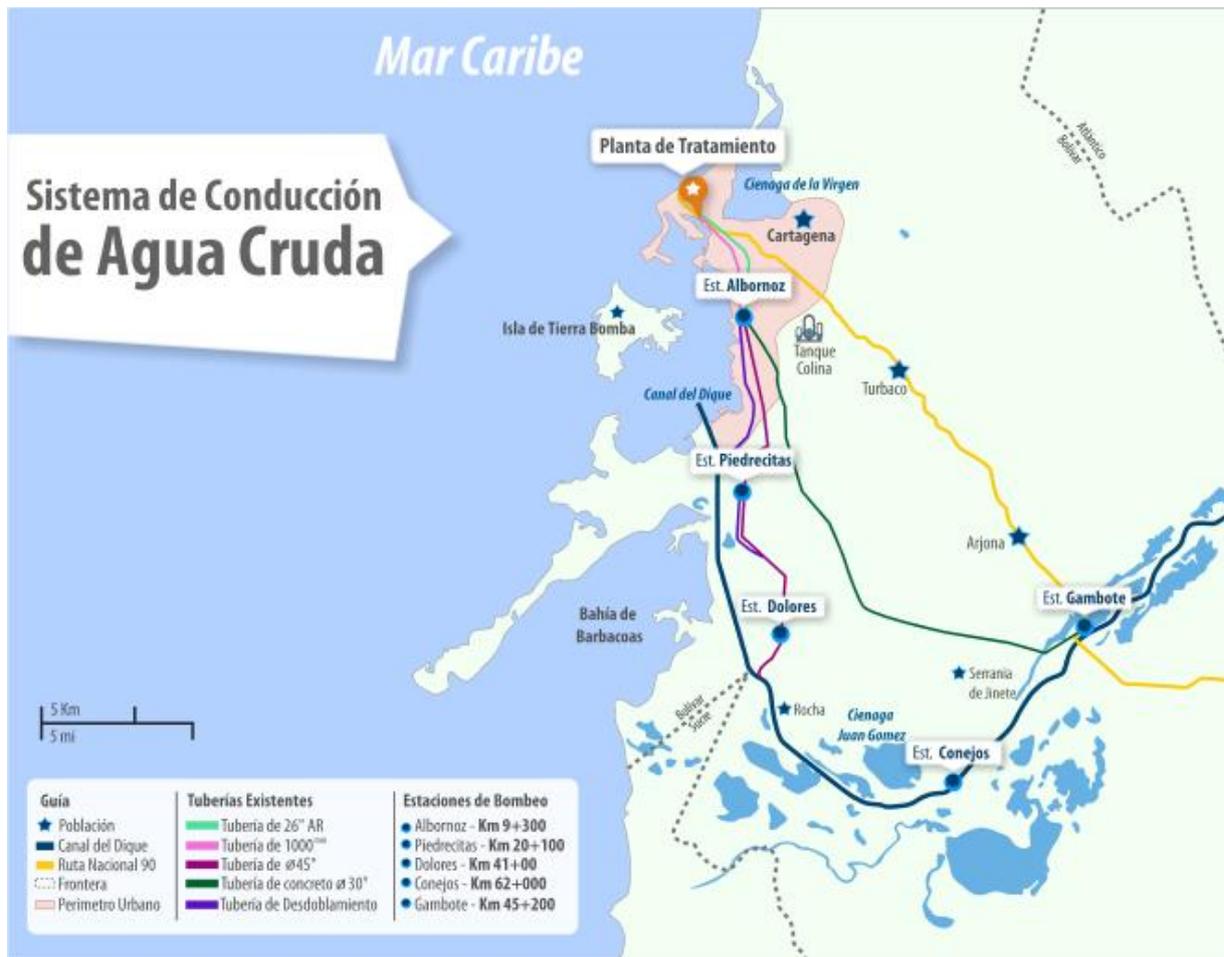
Tabla 4. Características generales del Canal del Dique 1930, 1941, 1951, 1982

Características	Después del dragado de 1923-1930 The Foundation Co.	1941 (G.M. Totten)	1951 (Standard Dredging)	1982 (Sanz Cobe Layne Dredging)
Longitud del canal	127 km	117 km	115 km	115 km
Trayecto de recta	75 km	79 km	82 km	
Número de curvas	270	113	93	50
Radio mínimo de curvatura	191 metros	350 metros	500 metros	1.000 metros
Tangente mínima entre curvas inversas	4 metros	101 metros	150 metros	
Ancho del canal en el fondo	35 metros	45 metros	45 metros	65 metros
Taludes de los costados	15:1	2:1	2:1	2:1
Profundidad mínima	2,14 metros	2,40 metros	2,40 metros	2,50 metros
Anchura mínima en la superficie del agua con 2,4 metros de profundidad	41.4 metros	56 metros	53 metros	75 metros
Volúmenes dragados	10.800.000 m ³	1.900.000 m ³	9.300.000 m ³	18.800.000 m ³
Costos de las obras			\$6.2 millones	\$3.051 millones

Fuente: Presidencia de la República, Bogotá, 1952, citado por Aguilera, 2006, p. 15.

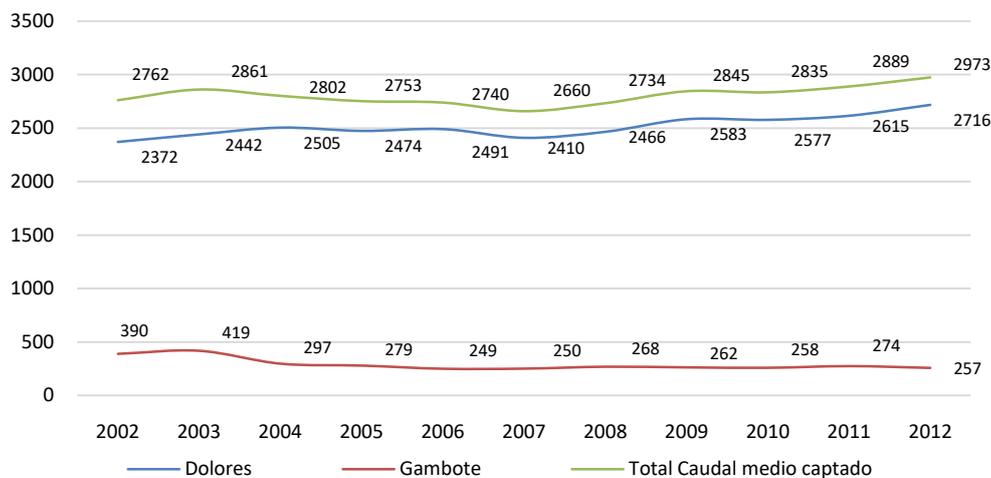
La **captación de agua cruda** la realiza ACUACAR a través dos sistemas independientes: Estación Sistema Lagunar Juan Gómez –Dolores y Estación de Gambote. La primera estación de bombeo representa cerca del 91% del agua que consume la ciudad (95.630.514 m³ en 2015); el restante 9% (9.624.949m³) es captado por la Estación de bombeo de Gambote. El sistema de acueducto también cuenta con estaciones alternativas de re-bombeo que se usan en diferentes épocas del año como la de Conejos, Piedrecitas y Albornoz. (Figura 7).

Figura 9. Sistema de Conducción de Agua Cruda



Fuente: Aguas de Cartagena S.A., (2016).

El caudal medio captado por la Estación Dolores en los últimos 10 años registró un incremento del 14,5%, al pasar de 2372 lts/seg a 2716 lts/seg en 2012, excepto en el año 2007, debido al Fenómeno del Niño que “produjo una reducción importante en los caudales transportados por el Canal del Dique, y por ende una disminución de sus niveles, reflejados en las estaciones de captación de agua cruda para la ciudad, sin afectar el suministro del agua potable” (Aguas de Cartagena S.A., 2015, p.67).

Gráfico 9. Caudal medio diario captado por estación (Lts/Seg)

Fuente: El autor con base en estadísticas de la Superintendencia de Servicios Públicos.

Flujo interior – Transformación y distribución

Las estaciones de Dolores y Gambote envían el agua cruda a la **Planta de Tratamiento el Bosque** “a través de una línea de aducción de 42 Km” (Agua de Cartagena S.A., 2013, p.9). Esta Planta está situada en el barrio Paraguay, se conforma internamente por tres plantas de tratamiento de tipo convencional, en las cuales se realizan, principalmente, los siguientes procesos físicos y químicos:

“**1) Coagulación:** Sirve para remover tierra, arenas y otras partículas disueltas en agua. Se agregan sustancias químicas para cambiar el comportamiento natural de las sustancias en suspensión, si normalmente estas tienden a repelerse entre sí, la Coagulación hace que estas tiendan a adherirse una a las otras o entre los químicos añadidos en el agua.**2) Floculación:** Luego del proceso de Coagulación, el agua se agita de manera suave y lenta para llevar a que las partículas de las sustancias suspendidas en el agua entren en contacto recíproco y se unan unas con otras para formar partículas más grandes que puedan ser removidas

fácilmente por sedimentación y/o filtración. Se adiciona químicos para facilitar la decantación de las sustancias que se encuentran suspendidas en el agua como el alumbre.**3)**

Sedimentación: El agua es llevada a una cámara donde se deja reposar para darle tiempo a las partículas de tierra, arena y demás sustancias pesadas que se encuentran el agua para hundirse y despejar el agua.**4) Filtración:** a través de filtros se elimina la turbiedad que pueda quedar para dejar el agua cristalina.**5) Cloración:** una cantidad de pequeña dosis de cloro es añadida al agua para librarla de bacterias u otros microorganismos que puedan estar en el agua y que podrían ser perjudiciales para la salud humana.**6) Almacenamiento:** el agua es guardada en tanques cerrados o de reserva para luego ser distribuida a través de la red de tuberías del acueducto.” (Aguas de Cartagena S.A., 2015).²⁶

Tabla 5. Sistema de tratamiento –Aguas de Cartagena, 2012

Nombre de la planta	Caudal medio de entrada (lts/seg)	Caudal medio de salida (lts/seg)	Tipo de proceso realizado
PLANTA No. 1	434	424	Cribado
			Floculación
			Sedimentación
			Desinfección
			Desarenación
			Aplicación de químicos
PLANTA No. 1	4	424	Filtración
			Mezcla rápida
			Floculación
PLANTA No. 2	434	424	Desarenación
			Sedimentación
			Cribado
			Mezcla rápida
			Aplicación de químicos
			Filtración
			Desinfección
PLANTA No. 3	1355	1323	Sedimentación
			Aplicación de químicos
			Desarenación
			Filtración
			Mezcla rápida
			Floculación
			Cribado
Desinfección			

Fuente: Informe de Ejecutivo de Gestión Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. Análisis del año 2012.

²⁶Información consultada el 24 de octubre de 2016 en la página Web de la empresa Aguas de Cartagena. Disponible en: <https://www.acuacar.com/Acuacar/Medioambiente/Desarrolloysostenibilidad/Procesossostenibles/Tratamiento.a.spx>

Una vez potabilizada el agua, se almacena en tanques para la distribución a los hogares, ya sea, desde la planta de tratamiento u otras estaciones alternas por medio de tuberías o redes (Tabla 6).

Tabla 6. Estaciones de bombeo existente para distribución del agua

Nombre de la estación de bombeo	Componente al que pertenece	Capacidad instalada (Lt/seg)	Tiempo de operación en el año (horas/año)	Volumen bombeando (m3/año)
Albornoz	Aducción	3.620	0	71.536.028
Blas de Lezo	Distribución	194	8.760	0
Colinas	Distribución	400	6.380	7.275.502
Dolores	Captación	3.220	8.760	79.004.080
El Limbo	Distribución	120	0	0
Gambote	Captación	725	8.760	9.370.323
La Paz	Distribución	97	0	0
La Popa	Distribución	13	8.760	942.149
Lomas	Distribución	425	3.285	3.379.523
Membrillal	Distribución	10	8.760	75.830
Nariño	Distribución	328	5.657	10.354.675
Piedrecitas	Aducción	3.050	8.760	76.177.024
Santa Lucia	Distribución	17	8.760	293.322
Zona Franca	Distribución	140	4.015	735.015

Fuente: Informe de Gestión de Aguas de Cartagena, 2012, p. 9.

Output –Flujo de salida

Como resultado del consumo de agua potable, se generan aguas residuales o vertimientos, esto es, “descargas de residuos líquidos, a un cuerpo de agua o una red de alcantarillado” (Decreto 1564 de 1984). Estas aguas antes de ser vertidas en cuerpos de agua, deben ser tratadas o depuradas para reducir los efectos contaminantes o ser reutilizadas, es decir, “aprovechadas en actividades diferentes a las cuales fueron originadas” (Ministerio del Medio Ambiente, 2001, Citado por Silva, Torres y Madera, 2008, p. 348), asimismo, las

autoridades ambientales tienen la obligación de ejercer control sobre dichos vertimientos” (Londoño y Parra, 2007, p.91).

En Cartagena de Indias, “antes de entrar en operación la Planta de Pretratamiento de Punta Canoas y el Emisario Submarino con vertimiento al Mar Caribe, en el año 2013, el 65% de las aguas residuales de Cartagena, eran vertidas a la Ciénaga de la Virgen, cuerpo de agua estaurino que tienen 22,5km² de espejo de agua, 4,5km de ancho, 1,60 metros de profundidad y bordea unos 50 barrios de las zona suroriental de la ciudad.” (Aguas de Cartagena S.A., 2015, p.118). El restante 35% de aguas residuales eran dispuestas en la Bahía de Cartagena (Palomino y Ahumada, 2015).

“La disposición de estas aguas sobre la laguna costera y la capacidad reducida de intercambio de las mismas provocó un gran deterioro del estuario, presentándose condiciones de malos olores, eutrofización, mortandad de peces, pérdida de su capacidad de auto regeneración y a su vez, riesgos en el bienestar y la salud de la población asentada en sus orillas y sus zonas de influencia” (Martínez & Arrieta, 2007, citado por Palomino y Ahumada, 2015, p.12).

De acuerdo a la empresa Aguas de Cartagena S.A., a partir del año 2013, las aguas residuales son eliminadas a través del Emisario submarino, una construcción de una conducción submarina de 2,85 km de longitud y 1,8 mm de diámetro para disposición de aguas residuales tratadas al mar Caribe en el corregimiento Punta Canoa, lugar donde se encuentra la Planta de Pretratamiento conectada a la tubería tanto del Emisario submarino como a la Estación de bombeo Paraíso, en la cual se reciben todas las aguas residuales para ser bombeadas a través de una conducción terrestre hasta la estación de pretratamiento en Punta Canoa.²⁷

²⁷Información publicada por Aguas de Cartagena S.A. en el sitio web: <https://www.acuacar.com/Acuacar/EmisarioSubmarino.aspx>. Fecha de consulta: Octubre 20 de 2016.

Figura 10. Emisario submarino, Cartagena de Indias



Fuente: Aguas de Cartagena S.A. (2016). Sitio web.

3.2. Resultados del cálculo del modelo

Partiendo de la caracterización de la ciudad, el planteamiento teórico sobre metabolismo urbano y los estudios relacionados con los determinantes del consumo de agua residencial y vertimientos de residuos, se analizan las relaciones entre Input y Output del proceso metabólico del agua potable del sector doméstico de Cartagena de Indias, mediante la formulación de un modelo de ecuaciones simultáneas en dos etapas (Mínimos Cuadrados en Dos Etapas –MCO2E). Para ello, se desarrolla en una primera etapa, la estimación de la ecuación de demanda “Consumo de agua residencial” como input del proceso del metabolismo urbano del agua potable del sector doméstico de la ciudad, partiendo del supuesto de que el consumo del recurso en cada sector es independiente entre sí. En la segunda etapa, se instrumenta la variable de Consumo de agua residencial en un modelo de vertimientos para identificar la relación de la cantidad consumida de agua y sus factores determinantes (Input) en las aguas residuales (output).

En la primera etapa la variable dependiente es:

$$LCar_t = \beta_{11} - \beta_{12} TD_t - \beta_{13} VPestr_t - \beta_{14} Prec_t + u_{1t} \quad (1)$$

Donde, $LCar_t$ = Logaritmo natural del consumo anual de agua por habitante ($m^3/hab.$); TD_t = es la tasa de desempleo de Cartagena, como proxy a medida de ingresos de los hogares (%); $VPestr_t$ = Variación anual de la tarifa de agua residencial ponderada por los usuarios según estrato (%) y $Prec_t$ = Precipitación media anual (mmilímetros al año -mm). A partir de los resultados de la estimación de la ecuación (1) se procede a predecir los resultados para la variable dependiente $LCar_t$.

Se consideró también la variable “Disponibilidad de almacenamiento de agua en el sector residencial” como factor potencial que podría incidir en la demanda de agua; sin embargo, no se cuentan con estadísticas y seguimientos a datos de los niveles de almacenamiento disponible en el sistema, así como tampoco se cuenta con datos estadísticos de la cantidad de horas personas afectadas por cortes de agua en la ciudad.

Entretanto, en la segunda etapa se procede a estimar la ecuación de aguas residuales con la variable dependiente $Vert_t =$ Vertimientos de agua residual (m^3) y las variables independientes $LCar_t =$ variable instrumental del Logaritmo natural del consumo anual de agua por habitante ($m^3/hab.$); $ConsIND_t =$ Consumo de agua anual del sector industrial (m^3); $ConsCOM_t =$ Consumo de agua anual del sector Comercio (m^3); $Dpu_t =$ Densidad poblacional urbana ($hab./km^2$); $Prod_t =$ Productividad de la industria (miles de pesos del PIB Industrial por personal ocupado). Es importante mencionar que en el grupo de variables se tuvo en cuenta la “Tarifas ambientales por vertimientos” como parte de los factores de potencial impacto en de volumen de aguas residuales; A pesar de esto, no se cuentan con serie estadística disponible por parte de la autoridad ambiental de la ciudad de Cartagena.

$$Vert_t = \beta_{21} + \beta_{22}LCar_t - \beta_{23}ConsIND_t + \beta_{23}ConsCOM_t + Dpu_t - Prod_t + u_{2t} \quad (2)$$

La congruencia estadística de cada una de las ecuaciones se determinó por medio de la t de Student para la significancia por variable, la prueba F para la significancia global de cada ecuación, el estadístico Breusch Godfrey para el nivel de auto correlación, la prueba Estadístico Skewness/Kurtosis para determinar la normalidad de las variables y el estadístico Breusch-Pagan/Cock-Weisberg para el test de heterocedasticidad (Anexo 1). Los coeficientes resultantes del modelo se validaron de acuerdo con la teoría propuesta.

Resultados del Modelo

En la primera etapa para el modelo de Consumo de agua residencial, el R^2 de la regresión es del 83%; de acuerdo con la t de *Student* los coeficientes son estadísticamente significativos y sus elasticidades congruentes con la teoría.

Las elasticidades indican que el consumo residencial de agua en la ciudad de Cartagena tarifas y responde de manera inelástica a variaciones en las precipitaciones. En efecto, un incremento del 1% en la tarifa de agua, reduciría sólo en 0,0014% la cantidad de m^3 de agua consumida en el sector doméstico, lo que indica que se requieren altos incrementos en la tarifa para poder reducir de forma significativa el consumo de agua, de hecho, el precio del agua tendría que subir un 17,4% para reducir en un 1% el consumo de m^3 agua.

De esta relación inelástica entre el consumo y las tarifas, se deduce que el precio no sería una alternativa eficaz para disminuir el consumo de agua en los hogares, por tanto, se requerirán medidas pedagógicas para que la sociedad autorregule el consumo de agua. De igual forma, la variable climática precipitaciones ($Prec_t$) resulta inelástica en el modelo, de modo que un incremento en 1 mm de precipitación promedio anual reduciría sólo en un 0,000072% el consumo per cápita de agua potable, esto se puede explicar por el hecho que las viviendas en Cartagena no cuentan con reservorios o sistemas alternativos para la recolección de aguas pluviales para su posterior uso, factor que reduciría significativamente el consumo de agua potable en los hogares; además, es escaso el uso exterior de las viviendas (jardines).

En contraste, un determinante del consumo de agua en el sector residencial de la ciudad es el ingreso de los hogares, medido de manera aproximada a través de la tasa de desempleo (TD).

Los resultados indican que un incremento del 1% en la tasa de desempleo reduce el consumo de m³ agua por habitante en un 0,02% anual, lo que evidencia que el pago de la factura tiene un peso representativo en la estructura de costos de los hogares, por tanto, ante reducciones en el ingreso del hogar, se disminuiría el consumo del agua potable a niveles que permitan atender las necesidades básicas del hogar.

Es importante mencionar que la variable climática de temperatura media anual, por lo general, es incluida en el modelo de consumo de agua residencial por sugerencia de la teoría; sin embargo, resultó estadísticamente no significativa en el modelo para Cartagena. De acuerdo a estudios de Maidment and Miaou (1986) citados por Worthington y Hoffman (2014) el efecto directo de la temperatura sobre el consumo de agua se ve reflejado de manera representativa cuando los cambios en la temperatura salen de los rangos promedios a los que está acostumbrada la población. En municipios de España, aumenta significativamente el consumo de agua en las viviendas cuando la temperatura es superior a los 35°C (Centro de Estudios Hidrográficos, 2012). En el caso de ciudades en Estados Unidos, la temperatura incide en el consumo de agua en niveles superiores a 21 C° (Worthington y Hoffman, 2006). Para el caso de Cartagena, con clima tropical seco durante todo el año, la temperatura media anual desde el 2000, se mantiene entre los 27,5 y 28,0 °C.²⁸

²⁸Estadísticas del IDEAM.

Tabla 7. Resultados de la estimación de la ecuación (1): Consumo de agua residencial

```
. regress LCar TD VPestr Prec
```

Source	SS	df	MS			
Model	.033552248	3	.011184083	Number of obs =	10	
Residual	.00646167	6	.001076945	F(3, 6) =	10.39	
Total	.040013919	9	.004445991	Prob > F =	0.0086	
				R-squared =	0.8385	
				Adj R-squared =	0.7578	
				Root MSE =	.03282	

LCar	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
TD	-.0221479	.0043372	-5.11	0.002	-.0327607	-.0115352
VPestr	-.0014604	.0028202	-0.52	0.623	-.0083612	.0054404
Prec	-.0000729	.0000278	-2.62	0.040	-.000141	-4.86e-06
_cons	3.887665	.0849612	45.76	0.000	3.679772	4.095557

Fuente: Elaboración propia, datos de las salidas de Stata.

En la segunda etapa, se estima la ecuación de vertimientos (output el proceso), para ello, se instrumenta la variable Consumo de agua residencial ($LCar_t$) a partir de la ecuación anterior (1). Como resultado, el modelo de vertimientos o agua residuales tuvo un R^2 del 99,9%, los estimadores z son significativos a un nivel de confianza del 95%.

La variable instrumental de Consumo de agua ($LCar_t$) tiene un fuerte impacto sobre la variable independiente vertimientos ($Vert_t$), el efecto marginal ante un incremento del 1% del agua consumida por habitante es de un incremento del volumen de aguas residuales en 22,4 millones de metros cúbicos anuales. Entretanto, por cada metro cúbico adicional de agua potable consumido en el sector comercio, -conformado principalmente por hoteles y restaurantes-, se incrementa en 0,076 metros cúbicos anuales las aguas residuales; mientras que, el aumento de un metro cúbico en el consumo de agua potable en la industria, no indica un incremento en el volumen de agua residuales vertidas en el sistema de alcantarillado de la ciudad, sino una relación inversa.

Son varias las causas que podrían estar generando este comportamiento. En primer lugar, el agua es un insumo del “proceso de transformación física y química de materiales y componentes de los productos” (DANE, 2007), principalmente, en la industria de alimentos, así que parte del agua utilizada en el proceso queda en el producto final entregado al consumidor o hace parte de los procesos de refrigeración de hornos o sistemas térmicos que evaporan (caso refinería e industria cementera). La segunda razón que se puede citar es el vertimiento directo en la Bahía de Cartagena o los canales pluviales por parte de las industrias con o sin licencia para realizar los vertidos, teniendo en cuenta que el sector Industrial de Mamonal no cuenta con sistema de alcantarillado. De acuerdo al comunicado y boletín de prensa publicado por la Contraloría General de la República (2014), “La Bahía de Cartagena es cuerpo receptor de vertimientos provenientes tanto del establecimiento de empresas industriales, especialmente en el sector de la Zona Industrial de Mamonal, como de algunas infraestructuras turísticas.” Por ello, parte de la contabilidad de estas aguas residuales no están registrados en Aguas de Cartagena, empresa encargada del Sistema de alcantarillado doméstico y no residencial de la ciudad, que desde el año 2013, realiza los vertimientos a mar abierto a través del emisario submarino. Esta entidad es la fuente de información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios sobre aguas residuales y la fuente de información tomada para realizar la estimación de la ecuación 2 del presente estudio.

En contraste, la productividad del trabajo en la industria ($Prod_t$) impacta la variable vertimientos ($Vert_t$), el efecto marginal de un incremento de un millón de pesos del PIB industrial por personal ocupado,²⁹ lograría reducir en $0,88 \text{ m}^3$ las aguas residuales. En este sentido, se espera que una mayor eficiencia en la actividad productiva de cada trabajador, represente usos más óptimos de los insumos empleados, entre ellos, el agua.

²⁹De acuerdo al DANE, incluye propietarios, socios, familiares, personal permanente y temporal contratado directamente por el establecimiento o a través de agencias

Por su parte, la densidad poblacional urbana (Dpu_i) tiene un efecto directo sobre los vertimientos. Un incremento de 10.000 personas por km^2 de área urbana, aumenta en $1863 m^3$ las aguas residuales anuales en la ciudad de Cartagena, esto es, $0,1863 m^3$ de vertidos por habitante urbano adicional. La cifra de 10.000 personas adicional por km^2 urbano representa una densidad poblacional de $22.484 hab/km^2$, manteniendo constante el área en actual, lo que equivale a un crecimiento del 40% de la población urbana respecto al año 2014, con ello, se generaría un incremento de cerca $11,8 m^3$ vertimientos adicionales anuales.

Diversos estudios (Salgado, 2011, Domene y Saudí, 2006, Muños, 2005) señalan que las ciudades con menor densidad poblacional se caracterizan por tener un mayor número de viviendas unifamiliares que las ciudades más compactas, y son, este tipo de viviendas las que registran un mayor consumo de agua frente a las viviendas plurifamiliares. Sobre ello, Domene y Saurí (2006) analizan el consumo de agua en el área metropolitana de Barcelona y encuentran que las familias de ingresos medios que residen en viviendas unifamiliares consumen más agua que los hogares con altos ingresos viviendo en un edificio de apartamentos.

Tabla 8. Resultados de la estimación de la ecuación (2): Vertimientos

aguares	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
LCar	2.24e+07	1799032	12.47	0.000	1.89e+07	2.60e+07
Dpu	1863.976	134.6604	13.84	0.000	1600.046	2127.905
ConsIND	-.1301107	.1032005	-1.26	0.207	-.3323799	.0721586
ConsCOM	.0756146	.1125335	0.67	0.502	-.144947	.2961761
Prod	-.880565	.1599725	-5.50	0.000	-1.194105	-.5670248
_cons	-7.57e+07	4302163	-17.60	0.000	-8.41e+07	-6.73e+07

Instrumental variables (2SLS) regression

Number of obs = 10
Wald chi2(5) = 1.1e+05
Prob > chi2 = 0.0000
R-squared = 0.9999
Root MSE = 21947

Instrumented: LCar
Instruments: Dpu ConsIND ConsCOM Prod TD VPestr Prec

Fuente: Elaboración propia, datos de las salidas de Stata.

Conclusiones

En este estudio se ha encontrado que tanto los organismos vivos como los ecosistemas, indistintamente de su complejidad, tienen funciones vitales que mantienen a través del intercambio continuo de energía, materia e información con el medio que les rodea. Esto se conoce como metabolismo y se caracteriza por ser un conjunto de procesos constantes que van desde la absorción, transformación, circulación y liberación de productos de desecho.

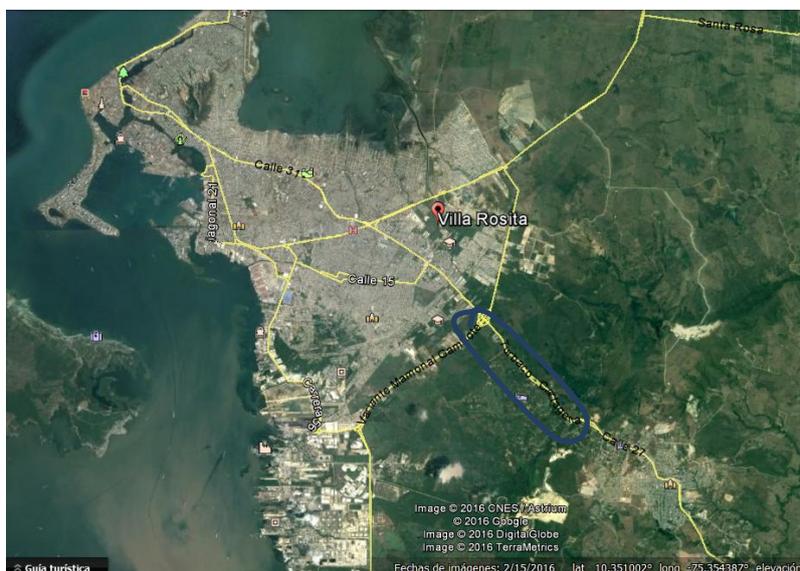
Tal como en los organismos y ecosistemas naturales, las ciudades como ecosistema artificial tienen su propio metabolismo que consta de tres procesos: 1) Entradas o inputs, 2) Transformación y 3) Salidas (outputs). El metabolismo urbano puede ser analizado en su conjunto o sobre un material en específico, como el agua, por ejemplo. En este sentido, los cálculos de metabolismo urbano de agua potable permiten identificar relaciones entre este material y componentes del sistema urbano para proporcionar elementos que permitan un mejor aprovechamiento del recurso.

En este estudio se ha encontrado que el consumo como INPUT del metabolismo urbano del agua potable de Cartagena de Indias está afectado en forma directa por los ingresos de los hogares, medido de manera aproximada a través de la tasa de desempleo y, en forma inversa e inelástica por la precipitación y la variación en las tarifas cobradas, las cuales, tendrían que aumentar en un 17,4% para reducir en un 1% el consumo de m^3 agua. Por ello, se deduce que el precio no sería una alternativa eficaz para disminuir el consumo de agua en los hogares.

Existen alternativas de regulación de la demanda de agua vía restricciones técnicas y operativas (paros programados, suspensiones del servicio por horas determinadas, etc.);

Aunque, lo que puede regular el sistema es contar con mejores capacidades de almacenamiento de agua en los hogares que acopie en épocas de lluvia y compense las épocas de sequía. Una opción para Cartagena es aprovechar las aguas pluviales que bajan de Turbaco en épocas de fuertes lluvias y afectan a los barrios Villa Rosita y Colón, mediante reservorios que permitan almacenar las aguas pluviales y sistemas de bombeo o potabilización alternos para el abastecimiento de agua (Figura 11). Para ello, es necesario realizar estudios hidráulicos que determinen la ubicación apropiada de los reservorios de agua lluvia.

Figura 11. Zona potencial para reservorios de agua lluvia

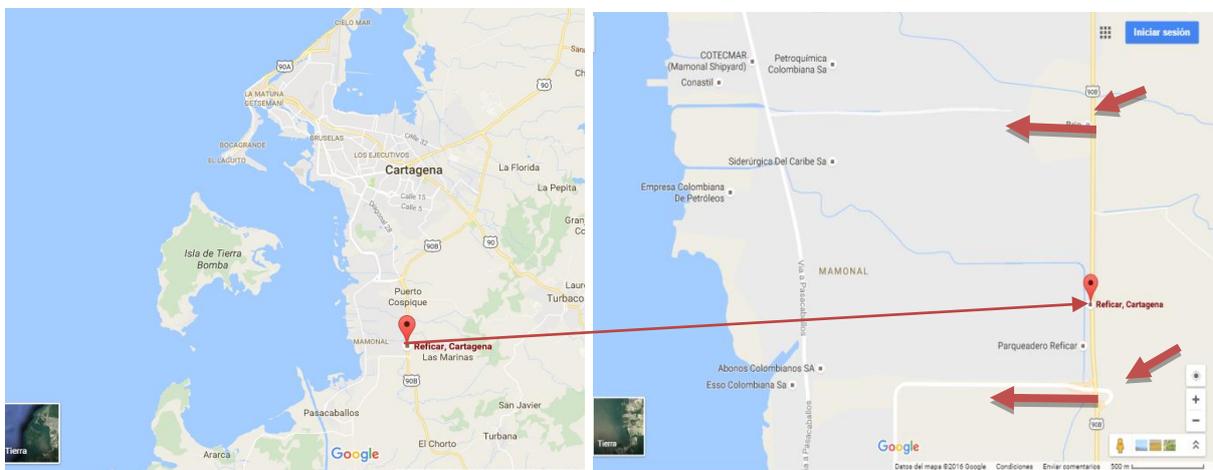


Fuente: Google Earth.

Por su parte, las aguas residuales constituyen el OUTPUT del proceso metabólico urbano del agua potable. En Cartagena, están afectadas en forma directa por el consumo de agua del sector residencial principalmente, seguido del consumo en el sector comercio. Llama la atención que el consumo de agua potable en la industria no indica un incremento en el volumen de aguas vertidas en el sistema de alcantarillado de la ciudad, sino una relación inversa. Esto se debe a que el sector Industrial de Mamonal cuenta con tubos alternos para

abastecerse de agua cruda en reemplazo del agua potable (Figura 12), además, no cuenta con sistema de alcantarillado, por lo tanto, este sector vierte sus aguas residuales directamente en la Bahía de Cartagena o en los canales pluviales aledaños, tengan o no licencia para realizar la operación. Por ello, parte de la contabilidad de las aguas residuales del sector industrial no están registradas en ACUACAR, empresa encargada del Sistema de alcantarillado de la ciudad y fuente de información para realizar las estimaciones en el presente estudio.

Figura 12. Tubos alternos de abastecimiento de agua cruda



Fuente: Google maps.

Otra variable que incide en la generación de aguas residuales es la densidad poblacional, en efecto, un incremento de 10.000 personas por km^2 de área urbana, aumentaría en 1863 m^3 las aguas residuales en Cartagena, esto es, sólo el $0,1863 \text{ m}^3$ de vertidos por habitante urbano adicional. Diversos estudios señalan que ciudades con menor densidad poblacional tienen más viviendas unifamiliares que las ciudades más compactas, y son, este tipo de viviendas las que registran un mayor consumo de agua frente a las viviendas plurifamiliares y por tanto, generan mayor cantidad de aguas residuales.

Al respecto, en Cartagena existen dos comportamientos que deben ser diferenciados: La ciudad de baja densidad poblacional que se está expandiendo en la zona norte con unas exigencias de aguas diferentes a la actual Cartagena que crece verticalmente, densificándose. Por ello, es de interés en futuros estudios, lograr espacializar los resultados, es decir, mapear el incremento de aguas residuales según el incremento en la densidad poblacional, para ello, se requiere contar con información sobre el número licencias de construcciones otorgadas por barrios en Cartagena o el número de nuevas factibilidades de agua otorgadas por ACUACAR con el fin de identificar de manera específica, los lugares de la ciudad que se están densificando y establecer la relación entre densidad poblacional y aguas residuales.

De igual forma, en estudios sobre el metabolismo urbano del agua potable se recomienda considerar la relación entre el consumo de agua y las licencias de construcción, el tipo de usuario que se está conectando a la red de agua potable, así como la tipología de viviendas en construcción. También, es de interés analizar el efecto que las tarifas ambientales en el volumen de vertimientos.

Una alternativa para manejar la carga de los vertimientos generados en la ciudad, es la implementación de tecnologías avanzadas aplicadas en la planeación urbanística a través de plantas de tratamiento con sistemas de usos alternos del agua tratada, extraída del sistema de alcantarillado para recircularla en actividades como el riego o extraer materiales orgánicos que pueden ser utilizados como abono, así se convertiría en negocio las aguas servidas y se reduciría el volumen vertido al mar o a la Bahía de Cartagena.

Por último, es importante superar los problemas en los sistemas de información de las autoridades ambientales Cardique y EPA (desarticulación de la información entre las

entidades, carente coordinación interinstitucional) a fin de establecer el seguimiento adecuado a las aguas residuales generadas, principalmente, en el sector industrial, así como identificar el tipo de aprovechamiento que se le pueden dar a los vertimientos del sistema.

Bibliografía

Abello, A., Novoa, D., y Balseiro E. (2006). Estudio de caso. Análisis de la articulación y estrategias de intervención de los sistemas educativo y económico de Cartagena de Indias. Recuperado de: http://www.ocaribe.org/publicacionesinfo_la-competitividad-de-cartagena-analisis-de-la-articulacin-entre-la-educacin-74?la=e

ACUACAR (s.f.). Anexo técnico del control de vertimientos a la red de alcantarillado. Recuperado de: <https://www.acuacar.com/Portals/0/AnexoT%C3%A9cnico%20de%20Vertimientos.pdf>

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (2008). Documento de trabajo El agua: Costos, tarifas y subsidios. Suiza. Recuperado de: http://www.pseau.org/outils/ouvrages/skat_ddc_hydroconseil_precio_del_agua_2008.pdf

Aguas de Cartagena. (2015). Informe de sostenibilidad 2015. Recuperado de: https://www.acuacar.com/Portals/0/REPORTE%20DE%20SOSTENIBILIDAD%202015_baja.pdf

Aguas de Cartagena. (2014). Informe de sostenibilidad 2014. Recuperado de: http://www.aloas.org/empresas/Documents/Aguas_de_Cartagena_RSE.pdf

Aguas de Cartagena. (2013). Reporte de Sostenibilidad 2013. Recuperado de: <https://www.acuacar.com/Acuacar/Responsabilidadsocial/Informes.aspx>

Aguas de Cartagena. (2016). Sitio web. Fecha de ingreso: 3 de noviembre de 2016.
<https://www.acuacar.com/>.

Aguilera, M., Arriera, A., Carreño A. y Uribe, C. (2015). Caracterización del comercio en Cartagena y Bolívar, 200-2014. Centro de Estudios Económicos Regionales del Banco de la República. (229), Cartagena de Indias, Colombia. Recuperado de:
http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_229.pdf

Aguilera, M. (2006). Canal del Dique y su Subregión: una economía basada en la riqueza hídrica. Centro de Estudios Económicos Regionales del Banco de la República. (72), Cartagena de Indias, Colombia. Recuperado de:
[http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/DTSER-72_\(VE\).pdf](http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/DTSER-72_(VE).pdf)

Aguilera M., y Meisel, A. (2009). Tres siglos de historia demográfica de Cartagena de Indias. Colección de Economía Regional. Banco de la República. Cartagena de Indias, Colombia. Recuperado de:
http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/lbr_3_siglos_histo_demo_cartag_0.pdf

Alcaldía de Cartagena de Indias. (2001). Plan de Ordenamiento Territorial de Cartagena, 2001-2009.

Álvarez, C. (2014). Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina* 2(2), p. 51-70. Recuperado de:
<http://revistas.unam.mx/index.php/inter/article/download/46524/41776>

Angeoletto, F., Essy, C., Ruiz, J., Fonseca, F., Massulo, R., Maciel, J. (2013). Ecología urbana. La Ciencia Interdisciplinaria del Planeta Ciudad. *Desenvolvimento em questao*. (32), p 6-20.

Aréchiga, H. (2000). *Homeostásis*. México D.F., México, Editorial del Centro de Innavasovestigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México.

Aristóteles. (2005). La Política. Traducción: Pedro López & Estela García. Ediciones Istmo. Madrid.

Arnold, M., Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Revista Cinta de Moebio*, (3), p 1-12.

Boisier, S. (2006). Algunas reflexiones para aproximarse al concepto de ciudad-región. *Estudios sociales*, 15(18), p. 1658-190.

Capel, H. (s.f). De las funciones urbanas a las dimensiones básicas de los sistemas urbanos. *Sistemas urbanos*, p. 219-248.

Caride, H. (30 de julio de 2004). La Metáfora ausente. Analogías biológicas y ciudad en la noción de ecología urbana. *Anales del Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas*, (139), p. 2-39.

Cartagena Cómo Vamos (2014). Presentación evaluación calidad de vida 2014. Recuperado de: <http://www.cartagenacomovamos.org/presentacion-evaluacion-calidad-de-vida-2014/>

Castaldo, B. (2012). De los paradigmas arcaicos a la teoría general de sistemas. Aplicación al análisis, creación y enseñanza del diseño. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona. Recuperado de: http://dpe.upc.edu/noticies/lectura-de-tesi-doctoral-de-los-paradigmas-arcaicos-a-la-teoria-general-de-sistemas.-aplicacion-al-analisis-reacion-y-ensenanza-del-diseno?set_language=es

Castro, P., Escoriza, T., Oltra, J., Otero, M., y Sanahija, E. (2003). ¿Qué es una ciudad? Aportaciones para su definición desde la Prehistoria. *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 7(146).

Chair, F.S. Chapin III, Robert Costanza, Paul R. Ehrlich, Frank B. Golley, David U. Hooper, J.H. Lawton, Robert V. O'Neill, Harold A. Mooney, Osvaldo E. Sala, Amy J. Symstad, y David Tilman. Ecological Society of America (la Sociedad Norteamericana de Ecológica).

Chaparro, F. (2011). "Ecología urbana". Investigación y ciencia. Noviembre de 2011.

Chang, M. (2001). La economía ambiental. En: ¿Sustentabilidad? Desacuerdo sobre el desarrollo sustentable. N. Pierri & G. Foladori (eds) Editorial Baltgráfica. Montevideo. p. 175-188. Recuperado de: http://rimd.reduaz.mx/coleccion_desarrollo_migracion/sustentabilidad/Sustentabilidad9.pdf

Centro de Estudios Hidrográficos. (2012). Estudio de los impacto del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen actual. Recuperado de: http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/EGest_CC_RH.aspx

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Cooperación Técnica República Federal de Alemania -CEPIS, (1990). *Módulos de formación y de perfeccionamiento del personal de las plantas de tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/022518/022518.htm>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe -CEPAL. Determinación del ingreso familiar. Encuesta integrada de hogares 1997–1998. Recuperado de: <http://www.cepal.org/deype/mecovi/docs/TALLER13/17.pdf>

Comisión Europea. (s.f). Recuperado el 17 de abril de 2016, de http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/glosario/abc/biomolecula.htm

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. Resolución CRA 287 de 2004. Recuperado de: <http://www.emcali.com.co/documents/10157/40532/287.pdf>

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico –CRA. (2016). Regulación integral del sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Recuperado de: <http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/>

Comisión Nacional del Agua (2005). Síntesis de las Estadísticas del Agua, Mexico.

Recuperado de:

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_JUNIO2005.pdf

Constitución Políticas de Colombia 1991. Fecha de consulta: 23 de agosto de 2016.

Recuperado de: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4125>

Conke, L., Ferreira, T. (26 de marzo de 2015). Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development. *Environmental Pollution*, (202), p.146-152

Contraloría General de la República (2014). Boletín: Función de advertencia contaminación

Bahía de Cartagena. Recuperado de:

http://www.contraloriagen.gov.co/web/guest/advertencias/-/asset_publisher/eKOyPE2KiiGH/content/funcion-de-advertencia-contaminacion-bahia-de-cartagena

Córdova, F., y Villagrana, A. (2015) “La ciudad modelada como ecosistema: principios y estrategias para la sustentabilidad de los sistemas del metabolismo urbano de la ciudad.”

Revista NODO Vol. 9 (No. 18):59-66. Enero – Junio, Bogotá, D.C. Colombia. Recuperado de: <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/465>

Decreto 1594 de 1984. Fecha de consulta: 6 de agosto de 2016. Recuperado de:

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (s.f.). Conceptos básicos. Recuperado de: www.dane.gov.co/files/inf_geo/4Ge_ConceptosBasicos.pdf

Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE. Ficha técnica PIB a precios corrientes del mercado. Recuperado de: <http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/anuales/ccrgbase2000/C16.kls>

Díaz, J. (2011). Metabolismo de la ciudad de Bogotá D. C.: Una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de:

Díaz, J., y Silva, J. (2015, enero-junio). Análisis del flujo de materiales en sistemas humanos – una revisión. *Revista EIA*. 23(12), p 149-161.

Dimitri, M. J. y Zavattieri M. (1982). *Fitogeografía y Ecología Vegetal*. Rev. Univ. Nac. Río Cuarto, Vol. 2, número especial. Recuperado de: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Competen.htm>

García, E. (2008, junio – diciembre). Cuerpo urbano, cuerpo humano. *Revista Logos*, (14), p. 83-92.

García, M., y Fairen, V. (1980). Estructuras disipativas algunas nociones básicas/1. *El Basilisco*, (10), p. 8-13.

Garrido, A., Teijón, J. (2006). *Fundamentos de bioquímica metabólica*, Madrid, España, Tebar. Gujarati, D. (2003). *Econometría*. McDraw-Hill Interamericana, Mexico, D.F.

Guyton, A. C. y Hall, J. E. (2011). Tratado de fisiología médica, Barcelona, España, Elsevier.

Higueras E. (2009). La ciudad como ecosistema urbano. Resumen del libro El reto de la ciudad habitable y sostenible, E. Higueras, Editorial DAPP, 2009, capítulo 2. Recuperado de: <http://oa.upm.es/16625/1/Ecosistema.pdf>

Inostrosa, L., (2013, mayo). Metabolismo urbano y apropiación de excedentes ecológicos. De la estepa a la arquitectura burguesa. *Revista Urbano*, (29), p. 31-44. Recuperado de: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/234>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM (2014). Estudio Nacional de Agua 2014. Bogotá D.C. Colombia. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/021888.htm>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM (2010). Estudio Nacional de Agua 2010. Bogotá D.C. Colombia. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/021888.htm>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2012). Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Indicadores+de+cambio+climatico+en+el+pa%C3%ADs.pdf/5ac540b8-e3f7-4076-91fe-d876f31101f9>

Izquierdo, A. (Semestre II de 2005). Ciudad: probabilidad emergente de un organismo vivo
Una aproximación epistemológica a la relación universidad-ciudad en tanto problema
filosófico contemporáneo. *Desafíos*, 13 (13), p. 206-237.

Malacalza, L. (2000). Ecología general. Elibro. ProQuest ebrary.

Medio Ambiente de Castilla y León. Sitio web, 2016. Fecha de ingreso: 20 de octubre de
2016.

<http://www.medioambiente.jcyl.es/web/jcyl/MedioAmbiente/es/Plantilla100/1218521951679>
/ / / . Sitio web.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Informe nacional de calidad
ambiental urbana. Recuperado de:
capitacion.siac.ideam.gov.co/SIAC/INFORME_CALIDAD_AMBIENTAL_URBANA.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Decreto número 2667. Recuperado
de: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=51042>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2005). Costos y tarifas Municipios Menores
y Zona Rural. Recuperado de: <http://www.cra.gov.co/es/novedades/boletines-y-publicaciones/15481-boletines-publicaciones>

Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y
saneamiento básico 2000. Recuperado de: http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/3._presentaciondocumento_tecnico.pdf

Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS. Bogotá, Colombia. Recuperado de: file:///C:/Users/Usuario/Documents/Tesis/Documentos%20de%20consulta/Agua%20estudios/Vertimientos/6._Sistemas_de_recoleccion_de_aguas.pdf

Moreno (2007). *Adopción de tecnologías más limpias en firmas industriales: un estudio multimétodo sobre el efecto de la aplicación de límites en vertimiento y tasas retributivas en Santander, Colombia*. Cuadernos de Administración. vol.20 no.33 Bogotá Jan./June 2007. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-35922007000100003

Moreno, T., Ibañez, J., y Cubillo, F. (2010). Los usos finales del agua como base para la caracterización y predicción de la demanda en la comunidad de Madrid. Fundación Canal de Isabel II. Madrid. 1-135.

Mostafavi, N., Mohamad, F., y Hoque, S. (October 29, 2014) A framework for integrated urban metabolism analysis tool (IUMAT). *Building and Environment*, (82), p. 702-712

Nieswiadomy, M. y Molina, D. (1991, agust). A Note on Price Perception in Water Demand Models. *Land Economics*, 67(3), p. 352-359.

Leal, G. (2008, 21 de noviembre). Ecoeficiencia urbana y sostenibilidad. Ponencia presentada en el Foro Internacional Construcción social del territorio (Pontificia Universidad Javeriana).

Ponencia llevada a cabo en Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://jennymancera.wikispaces.com/file/view/Ecoeficiencia+urbana+y+sostenibilidad.pdf>

Ley 388 de 1997. Fecha de consulta: 9 de septiembre de 2016. Recuperado de: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=339>

Newcombe K., Kalma J., Aston A. (1978). *The metabolism of a City: The case of Hong Kong*. *Ambio*. Vol. 7. No. 1. Pp. 3-15.

Londoño, R., Parra, Y. (2007). Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general. *Revista Épsilon* No 9: 89-104, julio – diciembre. Recuperado de: <http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/view/1957>

Ojea, N., y Cárdenas R. (2014). *Biología celular y humana*. ECOE Ediciones.

Universidad de Cartagena. (2010). Diagnóstico del Distrito de Cartagena en materia de Ordenamiento Territorial -Prediagnóstico componente ambiental. Cartagena de Indias, Colombia.

Palomino, A. Ahumada S. (2015). Variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen producto de la implementación del emisario submarino. Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. Recuperado de: <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/1381>

Peretó, J., Sendra, R., Pamblanco, M. y Bañó, C. (2007). *Fundamentos de bioquímica*, Valencia, España, Publicaciones de la Universidad de Valencia.

Polése, M. (1998). *Economía urbana y regional. Introducción a la relación entre territorio y desarrollo*, Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo –PNUD (2006). Informe de Desarrollo Humano. Más allá de la escases: poder, pobreza y crisis mundial de agua. Recuperado de: http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2006_es_completo.pdf

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2011). Colombia rural. Razones para la esperanza. Informe Nacional de Desarrollo Humano Recuperado de: escuelapnud.org/biblioteca/documentos/abiertos/06_indh2011co.pdf

Ramírez, L. (1998). Los dos significados de la ciudad o la construcción de la ciudad como lógica y como retórica. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, (27).

Rodríguez, D., Torres, J. (Junio de 2003). Autopoiésis, la unidad de una diferencia: Luhman y Maturana, *Sociologías*, 5(9), p. 106-140.

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal de México (2014). Informe Residuos sólidos en la CDMX. Recuperado de: www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/temas-ambientales/programas-generales/residuos-solidos

Silva, Torres, Madera (2008, julio - diciembre). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía colombiana*. 26(2), p. 347-359. 2008. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200020

Smith, R. H. (1965). Method and purpose in functional town classification. *Annals of the Association of American Geographers*, 539-548. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/2561571>

Superintendencia de Servicios Públicos (2013). Informe ejecutivo de gestión de Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. Bogotá D.C. Recuperado de: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/3091/32619/version/1/file/AGUAS+DE+CARTAGENA+ESP.pdf>

Stanley, 1935, Principios de ecología.

Terradas J., (2015). El pensamiento evolutivo de Ramón Margalef. *Ecosistemas*, 24(1), p. 104-109. Recuperado de: <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/1027/880>

Terradas J. (Octubre de 2014). Ecología para entender al mundo. (Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez), 8ª edición de las “Lecciones Fernando González Bernáldez”. Conferencia llevada a cabo en Madrid, España. Recuperado de: <https://www.uam.es/otros/fungobe/doc/lecciones6Terradas2014.pdf>

Terradas, J., Franquesa, T., Parés, M., Chaparro, L. (2011, noviembre). *Ecología Urbana. Investigación y ciencia*. Recuperado de: <http://www.uned.ac.cr/ecen/images/catedras/Terradas.pdf>

Toledo V., (2013). *El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica*. *Relaciones* 136, otoño, pp. 41-71. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rz/v34n136/v34n136a4.pdf>

Velázquez, J. (2009). Estimación de la demanda de agua urbana residencial factores que la afectan, conservación del recurso y planteamiento metodológico desde el ordenamiento territorial y las medidas de conservación. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: http://www.bdigital.unal.edu.co/867/1/71383331_2009.pdf

Warren-Rhodes K. y Koenig Al. (2001). Escalating Trends in the Urban Metabolism of Hong Kong: 1971-1997. *Ambio*, Vol. 30. No. 7. Pp. 429-438. Recuperado de: www.jstor.org/stable/4315178

Wolfgang F. E. Preiser (1983). *The Ecology of a City and Its People: The Case of Hong Kong*. By Stephen Boyden, Ken Newcombe, and Beverly O'Neill. *Human Ecology*, 2(11), p. XXI + 437 pp.

Universidad Externado de Colombia. (2012). *Guía de territorios y ciudades inteligentes*. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://estrategiaticolombia.co/ciudadesinteligentes/descargar.php?f=files/externado.pdf>

Zhang, Y., Xia, L., Fath, B., Yang, Z., Yin, X., Su, M, Liu, G. and Li, Y. (June, 2015). Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the

distribution of ecological relationships: Case study of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, p 14-14.

Anexo 1

– Test de Ramsey – para identificar si hay variable omitidas en el modelo

```
. ovtest

Ramsey RESET test using powers of the fitted values of LCar
Ho: model has no omitted variables
      F(3, 3) =      0.20
      Prob > F =      0.8932
```

Dado que el p valor no es menor que 0,05, se acepta la hipótesis de que el modelo no tiene variables omitidas.

– Breusch-Godfrey – Test para identificar Autocorrelación

```
. bgodfrey

Breusch-Godfrey LM test for autocorrelation
```

lags (p)	chi2	df	Prob > chi2
1	2.380	1	0.1229

```

H0: no serial correlation
```

De acuerdo con la Prueba Breusch-Godfrey en la salida anterior, se puede observar que el p-valor asociado al X^2 es 0.1229, lo cual confirma la no presencia de autocorrelación.

– Estadístico Skewness/Kurtosis -Test para Normalidad

```
. sktest RES

Skewness/Kurtosis tests for Normality
```

Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
RES	10	0.7664	0.8309	0.13	0.9353

Se acepta la hipótesis de normalidad.

– Estadístico Breusch-Pagan / Cook-Weisberg -Test para Heterocedasticidad

```
. hetttest

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity
Ho: Constant variance
Variables: fitted values of LCar

      chi2(1)      =      0.19
      Prob > chi2  =      0.6644
```

Se rechaza la hipótesis de heteroscedasticidad.