

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EL METABOLISMO URBANO COMO DISCIPLINA PARA
DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAS CIUDADES**

Tesis para optar el Título de **Ingeniera Civil**, que presenta la bachiller:

Úrsula Crisy Cárdenas Mamani

ASESOR: Ramzy Kahhat Abedrabbo, PhD.

Lima, Diciembre de 2016



A mi madre, cuyo amor se extiende hasta los espacios siderales.

A mi padre, que siempre creyó en mí.

Los amo y gracias por todo.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, el principio y el fin de todas las cosas, por darme todo lo que tengo. No pude haber pedido más.

Agradezco inconmensurablemente a mi asesor Ramzy Kahhat, quien sin duda alguna decidió aventurarse conmigo en esta empresa. Su guía y consejo durante estos tres años han muy valiosos para mí.

A mis amigos más cercanos por el apoyo, paciencia y compañía durante todos estos años.

A Elena, por su constante insistencia a terminar esta tesis.



RESUMEN

Existe un crecimiento acelerado de la población urbana y el aumento de las zonas urbanas. Asimismo, las actividades económicas y el desarrollo están asociadas directamente con las ciudades. De la misma manera, el consumo de materiales y energía aumenta a medida que las urbes crecen.

Aún existe la asociación de calidad de vida con el consumo de recursos, varios de estos recursos, antes considerados renovables, están dejando de serlo. Asimismo, las actividades que los seres humanos realizan ocasionan impactos negativos al medio ambiente. Estos impactos alteran funcionamiento normal de las comunidades antropogénicas (cambio climático). Se llega a formar un proceso cíclico autodestructivo que tiene que ser reducido con una mayor comprensión de las zonas críticas de consumo y contaminación: las ciudades.

El propósito de esta tesis es realizar una revisión de la disciplina novel Metabolismo Urbano a nuestro contexto social, que consiste en “analizar todos los procesos técnicos y socioeconómicos de las ciudades” esto se realiza a través del estudio de sus flujos de materia y energía. Con esto, se podrán determinar lineamientos para guiar a las ciudades a tener una gestión eficiente de recursos y por ende, sostenible.

Parte de esta tesis inquiriere en la historia de formación de la disciplina, desde los conceptos que parten de ciencias básicas y sociales hasta su cimentación como disciplina a mediados del siglo XX. Asimismo, se consideran las metodologías más importantes, más utilizadas y nuevas metodologías de la disciplina. Posteriormente, se desarrolla una metodología a través del análisis de estudios realizados a diez ciudades, con el que se determinarán indicadores comunes y se interpretarán los resultados. La última parte de esta tesis corresponde a un análisis simple de los flujos de materia y energía ciudad de Lima, la cual se analizará con los indicadores utilizados anteriormente. Finalmente, se concluye que el Metabolismo Urbano es una disciplina joven que requiere de una metodología uniforme y cuyos estudios sean comparables. Asimismo, se señala la necesidad realizar un estudio más profundo de los flujos de materia y energía en la ciudad de Lima para poder definir políticas de eficiencia de consumo.

ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
CAPITULO II: ALCANCES Y METODOLOGÍA	5
2.1 Alcances.....	5
2.2 Metodología.....	5
CAPITULO III: ESTADO DEL ARTE	7
3.1 El Concepto de Metabolismo	7
3.2 Aspectos Ecológicos.....	7
3.3 Aspectos Sociales y Económicos	9
3.5 Metabolismo Urbano en la Segunda Mitad del Siglo XX.	13
3.6 Ecología Industrial y Metabolismo Urbano.....	14
3.7 Análisis de Flujo de Materiales	18
3.8 Tendencias Actuales del Metabolismo Urbano	19
a. Modelo Lineal de Análisis de Flujo de Materiales.....	19
b. Modelo de Economías Europeas: EUROSTAT	21
c. El Metabolismo de la Antropósfera: Brunner –Rechberger.....	27
d. Urban Metabolism Analyst Model (UMAn).....	29
e. Sistema Socio-Ecológico Infraestructural (SEIS).....	34
f. Modelo Presión-Estado-Respuesta (DPSIR).....	36
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE ESTUDIOS Y SELECCIÓN DE INDICADORES	37
4.1 Definición de Problema /Contexto Socioeconómico.....	39
4.2 Definición de Sistema	42
4.3 Flujos de Entrada (Inputs) y Flujos de Salida (Outputs)	45

4.4	Indicadores.....	46
4.5	Cálculos e Incertidumbres	50
4.6	Observaciones y Conclusiones.....	53
CAPITULO V: LIMA METROPOLITANA COMO CASO DE ESTUDIO.....		62
5.1	Contexto socioeconómico – Antecedentes	62
5.2	Sistema	63
5.3	Inputs – Outputs	64
CAPITULO VI: CONCLUSIONES		68
REFERENCIAS		71



CAPITULO I: INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Actualmente, más de la mitad de la población mundial y el 80% en países desarrollados reside en ciudades o zonas urbanas (UN, 2006), estas zonas representan el consumo de la mayoría de recursos disponibles, provocando una degradación al ambiente, a escala local, regional, y global (Kennedy, 2012a). Asimismo, se encuentran en una posición de riesgo, al ser altamente vulnerables a las amenazas medioambientales consecuentes tales como cambio climático, capacidad de carga de recursos no renovables, pérdida de biodiversidad, efectos en la biosfera por emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), daños irreversibles a los ecosistemas naturales (World Bank, 2010).

Existen tres aspectos claves respecto al desarrollo actual de ciudades (Hodson 2012): el primer aspecto es la gran ola de urbanización, que está en curso. Se proyecta que habrá un crecimiento urbano de 4 billones de personas entre el año 1950 y 2030. Se sugiere que para el año 2050 el 70% de la población mundial vivirá en áreas urbanas (UN, 2006). El segundo aspecto trata de la producción económica y consumo. La mayor concentración de recursos y materiales manufacturados se situará en las ciudades. A pesar que las ciudades industrializadas poseen una alta concentración de PBI, los países en desarrollo serán la fuente de las nuevas concentraciones de Producto Bruto Interno. Las mega-ciudades dejarán de contribuir al crecimiento urbano tanto como lo harán las ciudades medianas (de 150,000 a 10 millones de habitantes). El tercer aspecto se basa en el consumo de los recursos, el 75% de la energía y flujos de materia se concentrarán en las ciudades. Al crecer las ciudades, la cantidad de habitantes por m² se reducirá de 3.2 a 2.7, causando un impacto en la demanda de recursos, al reducir la eficiencia de consumo. Habrá un cambio masivo de clases sociales, al entrar 460 millones de personas a la clase media, la mayoría proveniente de ciudades en países emergentes (Boston Consulting Group, 2010), a pesar de los esfuerzos de muchas sociedades de poseer un estilo de vida más sostenible, el crecimiento socioeconómico aún está asociado a un mayor consumo de recursos.

Las ciudades se convierten en un factor clave para el desarrollo de la sostenibilidad en el mundo. Una comprensión trascendente de la relación entre la calidad de vida

en las ciudades y cómo esta maneja sus recursos requiere el análisis de los sistemas de infraestructura en todos los niveles. Infraestructura refiere a todo aquello creado por el hombre para beneficio de este, y cuya principal función es facilitar el desarrollo de actividades humanas. Para un mayor orden, la UNEP (2012), señala cinco áreas temáticas de infraestructura: Eficiencia energética, manejo de residuos, transporte urbano, agua potable y desagüe, y manejo del ecosistema urbano. Todas estas áreas requieren de la integración de un rango de sectores y disciplinas. La toma de decisiones adecuadas respecto a todos los niveles de infraestructura cumple un rol importante para lograr una transición a modos más sostenibles de comportamiento en el futuro.

El Perú se encuentra en un periodo caracterizado por tener un crecimiento continuo, en el aspecto económico y social. Asimismo, es considerado como un país en vías de desarrollo. Es por ello que el resultado principal del crecimiento en el Perú proviene de la exportación de materias primas, en particular minerales. Sin embargo, existe un avance en el sector de exportaciones no tradicionales como la agroindustria en zonas costeras (Ghezzi y Gallardo, 2013). La preocupación de cubrir las necesidades básicas migre hacia otros aspectos que también son necesarios para el bienestar de la sociedad. Uno de esos aspectos es el desarrollo urbano, que incluye y resalta el manejo eficiente de recursos. Por lo tanto, en la mayoría de ciudades importantes del país aún no existe la iniciativa de realizar algún tipo de plan o estrategia del desarrollo de la ciudad.

La Municipalidad Metropolitana de Lima (MML) ha realizado un plan estratégico urbano planificado para la implementación de políticas y reglas para el periodo 2012 – 2035 (IMP, 2014a). Sucesora del Plan de Desarrollo Metropolitano de Lima-Callao, tiene como objetivo ser un referente a largo plazo para todas aquellas acciones, obras y decisiones que se tomen en la MML y que también posee injerencia sobre las municipalidades distritales, vecinos, organizaciones y la sociedad en general con el propósito de mejorar el estado de una ciudad que tuvo un crecimiento insostenible y mal planificado en las últimas décadas por causantes político-sociales. De cierta manera, este plan identifica las actividades individuales y colectivas que todas las instituciones directamente involucradas necesitan realizar para poder alcanzar sus objetivos generales: Mejorar la calidad de vida, construir nuevos modelos de gobierno y contribuir al desarrollo sostenible de la ciudad (IMP, 2014a).

1.2 Justificación

Como los recursos y la energía que las ciudades necesitan son finitos, la dependencia de estas implica vulnerabilidad. Es importante identificar el grado de dependencia y su relación con el crecimiento económico lo cual consiste en poder reducir el ritmo de consumo de recursos o reducir el impacto ambiental negativo. El desarrollo sostenible en las ciudades puede ser entendido como “el desarrollo sin incrementos en la inclusión de materiales y energía en los sistemas urbanos, de manera que no afecten la capacidad de la biosfera para regenerarse y asimilar los residuos emitidos” (Goodland & Daly, 1996). Por ello, es función de la infraestructura de las ciudades conducir y dirigir los flujos de materia y energía que residen y atraviesan las ciudades. La clave del manejo de recursos está en cómo aquellas instituciones y entidades del gobierno regulan, diseñan y operan la infraestructura urbana de una manera innovadora (UNEP, 2012).

El término Metabolismo Urbano (MU) aparece como un concepto novel que permite entender cómo la red de infraestructura influye en los flujos de materia de energía en las ciudades. Este se puede definir como la “suma de todos los procesos técnicos y socio-económicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos” (Kennedy et. al, 2007).

El Metabolismo Urbano involucra la cuantificación de los insumos y recursos, el almacenamiento de energía, material, nutriente, agua y residuos. Entender todo el proceso puede ser útil para proveer medidas confiables de explotación de recursos y generación de residuos, que posteriormente sean utilizados como indicadores de desarrollo sostenible. Asimismo, los resultados que se generan son necesarios para poder determinar la problemática del manejo de recursos en cualquier sistema urbano, y eventualmente, permitirá determinar lineamientos para conseguir la reducción de impactos ambientales, sociales y económicos; y por último, que un sistema urbano sea sostenible (Kennedy et. al, 2012b).

Los sistemas urbanos no se componen solamente de elementos biofísicos, sino de elementos sociales, una interacción entre la infraestructura y el ser humano. El Metabolismo Urbano posee herramientas útiles, y los resultados que éstas nos otorgan son esenciales. Sin embargo, las metodologías de MU más recientes expresan representaciones simplificadas del sistema y no muestran completamente

la dinámica de todos sus elementos. A pesar de la dificultad de lograr un modelo que abarque todos los componentes de un sistema urbano, es importante tener un alcance multidisciplinario del Metabolismo Urbano, porque se permitirá tomar decisiones que afecten la mayoría de aspectos que permiten el desarrollo adecuado de los sistemas urbanos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo de esta tesis es realizar una revisión conceptual y metodológica del Metabolismo Urbano a través de sus bases intelectuales y el estado actual de la disciplina, para así proponer una metodología aplicada a ciudad de Lima.

1.3.2 Objetivos Específicos

Determinar las bases intelectuales y elementos claves de comprensión del Metabolismo Urbano, examinando las áreas de estudio que influyen esta y determinando su grado de importancia.

Identificar las herramientas metodológicas necesarias para mostrar la variedad de dimensiones y escalas requeridas para entender el Metabolismo Urbano.

Determinar una tipología a partir de estudios realizados de Metabolismo Urbano en el mundo. Analizar el estado actual de la disciplina y los retos que esta presenta en el futuro.

Establecer una metodología adecuada para la realización de un estudio de Metabolismo Urbano en la ciudad de Lima.

CAPITULO II: ALCANCES Y METODOLOGÍA

2.1 Alcances

El Metabolismo Urbano es el resultado de una serie de estudios que involucran perspectivas interdisciplinarias. Cada una de estas perspectivas serán detalladas y analizadas con el propósito de tener una visión completa del funcionamiento de las ciudades y bajo qué conceptos se concibió el término de metabolismo de las ciudades.

Existen numerosos estudios de MU en ciudades en todo el mundo, y se han creado marcos de trabajo e indicadores para poder determinar el flujo de materiales y energía en las ciudades. Se clasificarán estos estudios respecto a una serie de criterios definidos por el autor.

2.2 Metodología

Esta tesis surgió ante la necesidad de identificar la problemática mundial del consumo insostenible de recursos. En Latinoamérica, estudios de Metabolismo Urbano y su aplicación en ciudades se ha desarrollado en varios países (Piña & Martínez, 2014; Russi et al., 2008), pero no al nivel ni cantidad que en otras regiones más desarrolladas (Europa, Norteamérica y el Este de Asia). En el Perú el conocimiento del término es casi inexistente, sin embargo, la comprensión del funcionamiento de las ciudades es indispensable para una adecuada toma de decisiones en todos los niveles.

El estilo principal de esta tesis es el *Review Article*. Consiste en un análisis y extensión de ideas existentes, descubrimientos e investigaciones, a su vez que esta se encuentra comprometida con las ideas de los autores, trata de realizar un aporte que representa más que una opinión, y que esta es apoyado por pruebas factibles y raciocinio.

La primera parte de esta tesis consiste en una búsqueda de información. El objetivo es de poder entender el concepto de Metabolismo Urbano. En este tema intervienen diferentes disciplinas y se considera necesario señalar el aporte que cada una de estas ha contribuido, además, se realizara una revisión de la herramienta más

utilizada en el Metabolismo Urbano: Análisis de Flujo de Materiales (AFM). El AFM es una herramienta que permite contabilizar los flujos de materia en un sistema.

En el mundo se han realizado suficientes estudios de MU bajo diferentes criterios y con diferentes perspectivas. Por lo tanto, la segunda parte consistirá en una búsqueda exhaustiva de información global, gran parte de las fuentes de información provienen de revistas científicas y otra parte consiste en estudios publicados individualmente por instituciones gubernamentales, centros de investigación y organizaciones involucradas con el desarrollo de la sostenibilidad urbana.

La clasificación de estudios se basa según su origen: las tendencias se determinarán identificando la metodología que utiliza y se agrupará en caso la metodología sea la misma.

En esta tesis se han definido los siguientes procesos, necesarios para realizar un análisis de flujo de materiales de una ciudad:

1. Definición de Problema /Contexto Socioeconómico
2. Definición de Sistema
3. Definición de Inputs y Outputs
4. Indicadores
5. Cálculos e Incertidumbres
6. Conclusiones y Observaciones

Se han seleccionado a diez ciudades cuyos estudios contienen de alguna manera todos estos indicadores. Las ciudades seleccionadas son las siguientes: Paris, Londres, Estocolmo, Budapest, Bogotá, Hamburgo, Limerick, Bruselas, Suzhou y Los Ángeles. La información recogida de cada uno de los indicadores es detallada y luego explicada para el posterior análisis.

Asimismo, se realizara un análisis simple para realizar un estudio aplicado a la ciudad de Lima, determinando la disponibilidad actual de información.

CAPITULO III: ESTADO DEL ARTE

3.1 El Concepto de Metabolismo

El término metabolismo (del griego *Metabole*: cambio) fue formulado inicialmente en el siglo XIX para describir cambios químicos entre células vivas. Su uso en años posteriores ha sido generalizada en la biología y bioquímica para caracterizar procesos de descomposición y regeneración entre organismos individuales y entre organismos con su ambiente (Waschsmuth, 2012).

Todas las materias vivientes asimilan energía y la utilizan para desarrollarse. Los organismos vivientes, tales como son, se mantienen a sí mismos para poder sobrevivir, reemplazando materiales viejos con nuevos, y realizando dos actividades necesarias para la continua formación de macromoléculas: crecimiento y reproducción (Raven & Johnson, 2011). La célula, como unidad morfológica y funcional de todo ser vivo, realiza miles de reacciones bioquímicas cada segundo, y tiene el propósito de utilizar materia prima obtenida desde el medio ambiente, para convertirlos en bloques de proteína y otros compuestos unidos para su beneficio. La suma o totalidad de las reacciones bioquímicas en la célula, o en un ser viviente, se llama metabolismo.

El metabolismo incluye dos procesos. Por un lado, las reacciones que utilizan energía para realizar o transformar enlaces químicos son denominadas reacciones anabólicas o anabolismo. Por el otro lado, las reacciones que recogen energía cuando los enlaces químicos se rompen son llamadas reacciones catabólicas o catabolismo, ambas reacciones son formadas por vías metabólicas, secuencias de reacciones catalizadas por enzimas, tan ordenadas que el producto de una reacción es material para el siguiente (Raven & Johnson, 2011)

3.2 Aspectos Ecológicos

El metabolismo se considera usualmente como una función específica a organismos. Sin embargo, se intentó adaptar estas ideas a escalas mayores de la jerarquía biológica para que este término sea funcional para prácticamente cada elemento viviente en la biosfera. Queda entonces en discusión si la organización dentro de la unidad celular y organismo se pueden replicar en un sistema más complejo como es un ecosistema, población o sistema urbano.

El ecologista E. P. Odum fue uno de los primeros en extender la idea de metabolismo más allá de los organismos y lo aplicó al estudio de los sistemas compuestos por varios organismos actuando en un contexto espacial-temporal complejo, en este caso, un ecosistema. Odum formó la idea de sistema ecológico determinando tres modelos de sistemas: de intercambio simple, un sistema de retroalimentación, y en donde el sistema es controlada por otro subsistema que determina si la información es necesaria o no (Patten y Odum, 1981). Los ecosistemas y sus elementos poseen diversos objetivos atemporales, limitados por su capacidad de retroalimentación en actividades primarias (desplazamiento y transformación de materia y energía orgánica e inorgánica).

Es por ello que Odum, al elevar el metabolismo a escala urbana, consideró a las ciudades como “heterotróficas” (Odum, 1975), y posteriormente como ecosistemas parasitarios, porque en vez que estos sistemas produzcan sus propios alimentos/nutrientes, consume el recurso natural de sus alrededores, contaminando el agua, aire y otros recursos (Odum, 1989).

El comportamiento de los sistemas urbanos están basados en dos objetivos: la perpetuidad y supervivencia. Burgess (1967) al relacionar la analogía de las unidades biológicas con los sistemas urbanos, identificó dos características que comparten estos sistemas: 1) Movilidad, que consiste en el movimiento voluntario y no rutinario de sus elementos, los ecosistemas están compuestos de organismos cuyas actividades no poseen patrones rutinarios y automáticos en que se realizan sus actividades, y esto tiene como consecuencia 2) la organización o desorden. El desorden permite una reconfiguración de las funciones principales de la ciudad/ecosistemas para que se convierta en un sistema organizado. Este concepto, si bien realiza un símil entre el metabolismo en un sistema urbano y natural, excluye a la naturaleza de su análisis. Todos los bienes materiales provienen de materia proveniente de la naturaleza y al aislar el sistema el crecimiento, reducción u organización detallados por Burgess no serían posibles de lograr.

Clements (1916) postuló una teoría de sucesión de comunidades, las cuales son concebidas como organismos estables propensos a recuperarse con disturbios de menor grado, sin embargo, Tansley (1935) consideró que en vez de llamarse “organismos”, se debería utilizar un acercamiento más neutral a cómo la naturaleza está estructurada, el concepto “sistema” que incluye no solo la relación

organismo/complejo en que este reside, sino aquellos factores físicos que conocemos como medio ambiente. El ser humano, al ser considerado dentro del sistema, afecta negativamente los ecosistemas naturales o las comunidades bióticas a escalas mayores, sin embargo, es muy difícil separar las actividades de estos con los de la naturaleza, porque al fin y al cabo, nuestro origen es natural. Por ello se considera a la actividad humana un factor biótico poderoso, que afecta el equilibrio de ecosistemas preexistentes y que también forma nuevos ecosistemas de diferente naturaleza (Pickett, 2009).

La discusión acerca de si la definición de metabolismo también puede ser aplicada a escalas mayores aún sigue presente. Las actividades comunes y necesarias para que un ecosistema, comunidad o ciudad funcionen no son usualmente consideradas como metabolismo en términos biológicos. Se reconoce fundamentalmente el proceso de consumo de materia y producción de energía para el desarrollo del sistema. Sin embargo, la discusión se dirige a la integración entre los elementos del sistema y cómo ésta se controla cómo si existen mecanismos de organización y optimización de consumo de energía y nutrientes (Fischer-Kowalski, 1998a).

3.3 Aspectos Sociales y Económicos

Se puede estimar que la primera propuesta del concepto de metabolismo asociada con las ciencias sociales fue formulada por Karl Marx (1861), con una protesta acerca de un vacío metabólico entre los seres humanos y la tierra. Marx argumentaba que la relación entre ser humano y naturaleza se veía afectada por la “producción capitalista”, que solamente se vuelve hacia ella una vez que su influencia la haya agotado y después de haber devastado sus cualidades naturales. Bajo el ejemplo de los sistemas de drenaje y desagüe en la ciudad de Londres, Marx implica que la falta de manejo de sus residuos tiene contraparte en la contaminación de la misma ciudad (Marx, 1861). Engels compartía las mismas ideas respecto a restablecer la relación entre la producción industrial y de agricultura y la población (Engels, 1872).

Thomas R. Malthus (1888), un clérigo y economista inglés, propuso un modelo de crecimiento poblacional en base a una recolección empírica de información. Este modelo representa a la hoy conocida teoría Malthusiana, en donde señala que las poblaciones humanas tienen una capacidad exponencial de crecimiento. Asimismo, la producción de alimentos, al expandirse e implementar nuevas tecnologías, sólo puede crecer aritméticamente. Por lo tanto, cada cierto periodo la cantidad de

personas sobrepasará la cantidad de alimento disponible. Como consecuencia, se generaran conflictos y hambrunas por la escasez hasta que la población se diezme a niveles que se puedan sostener. Según Malthus, este proceso se repetiría indefinidamente. Esta teoría implica que existe una capacidad de carga de materiales para el hombre y que el crecimiento poco sostenido causaría problemas serios de desarrollo humano.

Frederick Soddy, señaló que la energía es un factor crítico y limitante para la sociedad, a través de la comparación de las economías con una máquina perpetua, que acorde con la segunda ley de termodinámica¹, necesita de recursos externos para sostenerse. Asimismo, criticó la idea que la riqueza generada es infinita (Soddy, 1912, 1922). Wilhelm Ostwald en 1909, también propuso que según la segunda ley de termodinámica, mientras más eficiente es la transformación de energía a partir de energía cruda, mayor será el progreso de la ciudad. El aumento de eficiencia influye a cada ser viviente, organismo y sociedad. Según Ostwald, una economía sostenible debe ser alimentada prioritariamente por energía solar. Fred Cottrell (1955), también señaló la idea de que la energía disponible limita el rango de actividades humanas, esta es una de las razones por las que los cambios sociales, económicos y políticos acompañan la transición de una sociedad de baja a alta energía.

Finalmente Georgescu-Roegen (1968), utilizando como referencia las afirmaciones de Soddy y la segunda ley de la termodinámica, manifestó que las economías son similares a un sistema viviente, y es así como consume materia y energía de baja entropía (alimentos para los seres vivos y energía, materia prima para una economía). Y como todo ser viviente, también produce materia y energía degradada o de alta entropía (residuos, calor residual, emisión de gases). Aun considerando el reciclaje, la energía, una vez utilizada, nunca regresará al nivel inicial de disponibilidad de nuevo.

Sir Patrick Geddes desarrolló un cálculo unificado a partir de flujos materiales y energéticos capaz de ser utilizado como un marco de trabajo para todas las actividades sociales y económicas (Geddes, 1884). Geddes desarrolló un tipo de tabla Insumo-Producto económico en términos físicos. La primera columna

¹ La Segunda Ley de Termodinámica explica que el estado de entropía del universo, como un sistema aislado, siempre incrementará con el tiempo. La entropía es una propiedad de los sistemas termodinámicos, es la medida del desorden (molecular). A mayor entropía, mayor desorden.

contendría las fuentes de energía y materiales, estos serían transformados a partir de tres actividades: extracción de materia prima y combustibles fósiles; la manufactura, el transporte y el intercambio.

3.4 Odum y el Concepto de Emergía

La concepción ecológica propuesta por H. T. Odum y E. P. Odum se concibió bajo el principio de metabolismo de un ecosistema: La producción (vía fotosíntesis) y consumo (por respiración) de materia orgánica en un ecosistema es expresada típicamente en términos de energía (Odum, 1971).

Así como el metabolismo en organismos naturales es expresado en unidades de energía, el equivalente a la energía utilizada en una ciudad se conoce como “Emergía” (*Emergy* en su idioma original). Se define como la “energía disponible de cualquier tipo utilizada directa e indirectamente para hacer un producto o realizar un servicio, por ello, todos los flujos de materiales son transformados a flujos de energía” (Odum, 1996). El propósito de este análisis es que el estudio de flujos energéticos sea más accesible.

La energía de un tipo no puede ser equivalente a otro tipo de energía. Para unificar estos tipos de energía disponible se utilizara la energía solar como base, y su unidad es el *emjoule solar* (*sej*).

Existen tres factores de conversión para igualar valores en un sistema simple de unidades que pueden compararse entre sí:

Transformidad: Es igual a la emergía solar dividida por la energía disponible de un producto. La energía solar es considerada en esta fórmula por ser la fuente primaria de energía en todos los ecosistemas terrestres. Mientras más grande es la *transformidad*, más energía solar (*sej*) es necesaria para fabricar un producto, y mayor su posición en la jerarquía energética de la biosfera

Energía Específica: Se nombra así cuando los flujos son expresados en unidades de masa, la conversión es expresada en unidades de masa, el factor de conversión es expresado en *sej/g*.

Energía por unidad monetaria: Con el propósito de poder adaptar estos flujos a la economía, se calcula la cantidad de emjoules solares por unidad monetaria (*sej/\$*) (Odum, 1989, 1996).

Para ilustrar los patrones de organización, interacciones, transacciones monetarias y vías de flujo de energía de los componentes en el sistema, se utilizan los *diagramas de sistema energéticos*, símbolos que detallan fácilmente un sistema y su interacción con otros elementos.

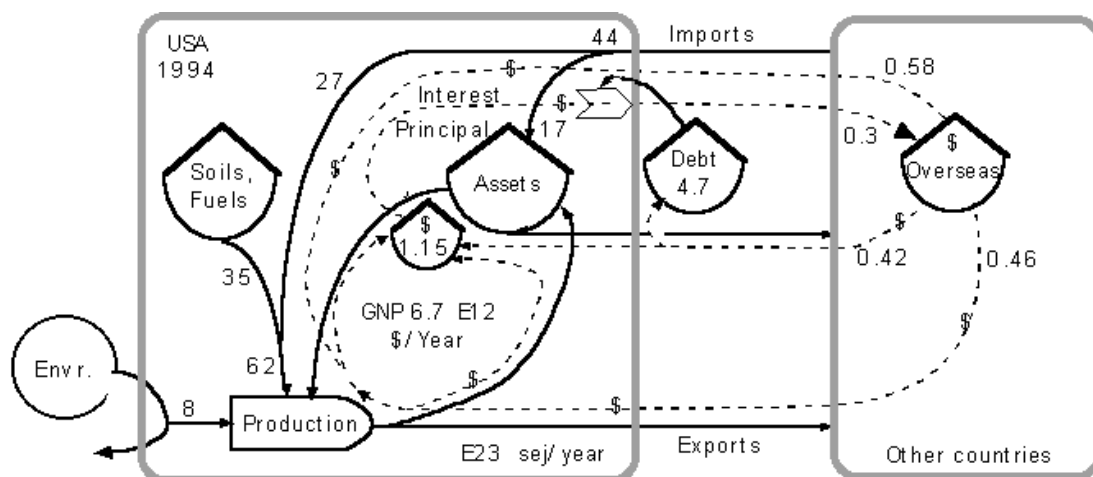


Figura 1. Diagrama de sistema energético de la macroeconomía de Estados Unidos. Fuente: Odum (1998)

Varios análisis de este tipo se han realizado para ciudades en específico. Zuchetto (1975), realizó un estudio en donde contabilizó los flujos de materia y energía de la ciudad de Miami desde 1950 a 1972. En estas últimas décadas, esta metodología ha vuelto a traer adeptos, especialmente en el continente asiático. Por ejemplo, Huang (1998), Huang & Hsu (2003), y Huang & Chen (2009) analizaron los flujos de energía de Taipei. Cambpbell et al. (2005) evaluaron West Virginia, y Zhang et al. (2009a, 2009b) se enfocó en Pekín y otras 5 ciudades mayores de China.

El trabajo de Odum, una propuesta interesante de análisis metabólico de ciudades, a pesar de ser desarrollada antes de la aceptación de otras metodologías como el Análisis de Flujo de Materiales y Análisis de Ciclo de Vida, no tiene la popularidad de estas. Tal vez porque una de las desventajas del modelo es que los índices de transformación deben ser determinados para todos los flujos, y los métodos de análisis para residuos no han sido unificados, para poder transformar todos los flujos a unidades energéticas es necesario tener un catálogo de todos los materiales y energía a transformar, una tarea de por si complicada para aquel que intente analizar *energéticamente* una región urbana (Hau y Bakshi, 2004).

3.5 Metabolismo Urbano en la Segunda Mitad del Siglo XX.

Al final de la década de los 60, surgió la necesidad de priorizar el interés a los temas que señalan la importancia de los procesos naturales y físicos en el desarrollo de la sociedad. Se realizó una serie de acercamientos, generados por científicos naturales, y luego por científicos sociales, que relacionan los flujos materiales y energéticos entre sociedades con el medio ambiente natural. Se llegó a la conclusión que si se seguía llevando a cabo las actividades como están, se llevaría eventualmente a la devastación de la vida humana. Este interés dio como resultado una serie de publicaciones, provenientes en su mayoría de Estados Unidos, cuyas discusiones políticas acerca del medio ambiente se habían desarrollado en ciernes respecto a otros países (Fischer-Kowalski, 1998b).

La primera concepción factual del concepto de Metabolismo Urbano proviene de un revolucionario artículo publicado por Abel Wolman llamado "El Metabolismo de las Ciudades". Este artículo surge en una época en donde se comenzó a plantear la limitación de la cantidad de recursos disponibles en el planeta y sentir una creciente preocupación por cómo la expansión urbana y las acciones de los humanos que residen en esta impactan en el medio ambiente. Wolman propone una modelación metabólica de una ciudad ficticia de un millón de personas. Asimismo, plantea un modelo de ingresos y salidas de los flujos de energía, agua, materiales y residuos (Wolman, 1965). Wolman realiza un análisis, el cual enfatiza como principales problemas metabólicos, a los flujos de agua, emisiones al aire y residuos. Este análisis se realiza en base a datos nacionales de ese periodo, a la vez realiza un análisis económico de las alternativas propuestas e implica un llamado de acción por una problemática que hasta ahora sigue latente. Uno de los aspectos más interesantes de la publicación de Wolman es que considera la ciudad como un ecosistema, y describió como materiales y energía fluían dentro del sistema, en la misma manera que los organismos en un ecosistema consumen recursos tales como luz solar y alimentos; y como consecuencia, se generan residuos.

Después de la publicación de Abel Wolman (1965), otros científicos realizaron investigaciones de similar temática. Robert Ayres y Allen Kneese (1969), presentaron lo que sería años después un análisis de flujo de materiales de economías nacionales. Según ellos, la economía se veía de bienes ambientales como el agua y aire. Proponen un modelo de equilibrio general para los Estados Unidos, y afirman

que la falla común de las economías proviene de la manera en que los procesos de consumo y producción se realizan, porque estos varían con la ley fundamental de conservación de masas. En este caso, todos los insumos de la producción serían convertidos directamente en productos, sin residuos; o que los productos (residuos) sean destruidos completamente. Bajo esto, la solución sería el reciclaje de los materiales en bienes productivos. Entonces, se propone definir la contaminación ambiental como un problema de balance de materiales para la economía.

En 1977, Duvigneaud y Denayeyers analizaron la ciudad de Bruselas utilizando ecosistemas naturales como analogía. Realizaron un análisis de importaciones y exportaciones de productos como combustibles fósiles, materiales de construcción, comida, agua, residuos, etc. Se concluyó que Bruselas dependía altamente de sus áreas rurales colindantes, con la ciudad importando energía de fuentes externas. Se sugirió cambiar las fuentes de energía por aquellas renovables como la energía solar.

A partir de la década de los 90, surgió otra serie de publicaciones referentes al Metabolismo Urbano, en este caso provenientes de Europa, específicamente de Alemania, Holanda y los países escandinavos (Fischer-Kowalski, 1998b). Esta serie de investigaciones se enfocó principalmente en realizar estudios a escalas nacionales, y de materiales o flujos específicos más que un análisis completo de un sistema urbano, sin embargo, permitió mejorar aspectos metodológicos que no se habían tomado en cuenta, por ser una disciplina joven.

3.6 Ecología Industrial y Metabolismo Urbano

Los ecosistemas son sistemas complejos de los cuales podemos aprender observando sus comunidades, que poseen la capacidad de ser resilientes, robustos y permanentes. Se convierte entonces en una oportunidad de utilizarlos como fuente de nuevas ideas para rediseñar la sostenibilidad en las ciudades. La Ecología Industrial es la disciplina que permite adaptar estos conceptos de resiliencia de sistemas, principios evolucionarios y retroalimentación dinámica propios de los ecosistemas (O'Rourke et. al, 1996).

La Ecología Industrial es el “estudio de los organismos tecnológicos, el uso de sus recursos, sus impactos ambientales, y la manera en que sus interacciones con el mundo natural pueden ser estructuradas para lograr sostenibilidad global dada cierta evolución económica, cultural y tecnológica”. (Graedel y Allenby, 2003). El sistema

tiene capacidades de optimización del ciclo material de materia prima, y es importante que no sea percibido aisladamente, sino que se debe tomar en cuenta la naturaleza que lo rodea, el ciclo se considera desde la materia prima, componente, producto, producto obsoleto y finalmente como residuo. (Graedel y Allenby, 2003). La perspectiva “industrial” parte de la idea que la sociedad, si se adapta sus procesos, instituciones y actividades de cierta manera a los principios aprendidos de los sistemas ecológicos, se podrá avanzar a ser una economía más sostenible.

Tabla 1. La metáfora de la Ecología Industrial en el diseño de sistemas sostenibles.

Fuente: Adaptado de Ferrão y Fernandez (2014).

Tema	Sistemas Antropogénicos	Sistemas Naturales	Lecciones a los Sistemas Sostenibles
Energía	<ul style="list-style-type: none"> - Producción Central, redes de distribución. - Uso directo de fuentes de energía, para un solo propósito. 	<ul style="list-style-type: none"> - Producción distribuida a cada planta por fotosíntesis. - Uso de energía alternado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Producción distribuida, construcción de fotovoltaicas integradas. - Sistemas integrados de energía, medidas de eficiencia energética.
Economía	<ul style="list-style-type: none"> - A base de dinero. - Enfocada en eficiencia, consumo y productos. - Sistemas lineales, extracción de materia prima, manufacturas y residuos. - Flujos de Materia. 	<ul style="list-style-type: none"> - A base de energía solar, enfocado en recursos. - Enfocado en suficiencia, depende de servicios con otras especies, interdependencia. - Sistemas circulares. - Uso alternado de materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Impartir valores tales como solidaridad y voluntariado. - Necesidad de internalizar los límites de crecimiento. - Desarrollar nuevas estrategias de negocios enfocadas en proveer servicios. - Promover el reciclaje y el reuso. - Desarrollar infraestructuras para reciclaje.
Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> - Flujos de Energía. - Tendencia a promover culturas simples. 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformación de materiales en energía. - Diversidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Valorización energética de residuos, cuando no se encuentra un uso. - Agricultura en las ciudades a pequeña escala, bajo contextos.
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Dependiente de combustibles fósiles. - Uso de máquinas a base de combustibles fósiles. - Vehículos dependientes, solo cumplen funciones de transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en energía solar a través de la cadena alimenticia. - Capacidad natural de los individuos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de energías renovables para el transporte. - Facilita el uso de transporte sostenible. Integra vehículos eléctricos.
Sociedad, comportamiento de Individuos	<ul style="list-style-type: none"> - Enfocado en el crecimiento individual, eficiencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se enfoca en la eficiencia y crecimiento de individuos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Promueve la solidaridad, ética, servicios comunitarios e infraestructura.
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> - Tendencia a promover un desarrollo en base a segregación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diversificación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adoptar una estrategia multicultural en planeamiento urbano.

La Ecología Industrial puede presentarse como una extensión para conseguir métodos más eficientes en actividades industriales o como un cambio de paradigma completo (O'Rourke et. al, 1996). Esta disciplina nos acerca a la sostenibilidad con una visión de desarrollo, entendimiento y creación a través de dos contribuciones:

1. Un marco de trabajo para apoyar un cambio de paradigmas. Este cambio se basa en la metáfora de la Ecología Industrial. Puede ayudar a identificar soluciones nuevas e innovadoras para rediseñar las estrategias de desarrollo.
2. Herramientas con diferentes modelos y métodos para proveer métricas y permitir establecer un marco de trabajo multidisciplinario entre diferentes disciplinas, permitiendo que el individuo perciba el efecto de sus acciones y proveyendo el *feedback* necesario. (Ferrão y Fernandez, 2014, p. 8)

La Ecología Industrial provee un bagaje de herramientas, que permite analizar y medir todas las actividades y procesos necesarios de manera específica. Entre las más importantes se encuentran el Análisis Físico Insumo-Producto, Huella Ecológica, Análisis de Flujo de Materiales y Análisis de Ciclo de Vida.

El Análisis Físico Input-Output, conocido como PIOT (Physical Input-Output Table), es un análisis de las actividades macroeconómicas de un sistema. Es similar al AFM en la medida que también realiza un conteo de los flujos de materia y energía en un sistema determinado, sin embargo este se refleja y analiza mediante una tabla de Input-Output económico (Ayres y Ayres, 2002).

La Huella Ecológica (HE) Se encarga de la medición del requerimiento de las actividades del hombre mediante áreas productivas que incluyen la demanda de alimentos, materiales, energía y el consumo de dióxido de carbono (Global Foodprint Network, 2015).

El Análisis de Flujo de Materiales es una metodología que caracteriza flujos materiales que entran, se acumulan y salen de un sistema definido durante un periodo de tiempo.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología se encarga de analizar el ciclo de vida de un producto, sistema o servicio, desde que es materia prima hasta su descomposición o disposición final. A partir de este se pueden analizar los impactos ambientales en todas las fases de su ciclo de vida (ISO, 2004). Esta metodología

compone de cuatro fases: objetivo y alcances, inventario, análisis de impactos ambientales e interpretación de resultados.

El objetivo principal de la Ecología Industrial es adaptar los procesos naturales a los procesos antropogénicos, esta adaptación a escala de sistemas urbanos se conoce como Metabolismo Urbano. Como indicado anteriormente, consiste en el “análisis de los procesos técnicos y socioeconómicos” que ocurren en un sistema urbano definido (Kennedy, 2007). Se considera a las ciudades como organismos compuestos de subsistemas interconectados o niveles de infraestructura (sociales y económicos) y que también interactúan con el ambiente a través del intercambio y acumulación de materia y energía. Sin embargo, a diferencia de los sistemas naturales, este intercambio usualmente es desbalanceado, principalmente porque los residuos que pueden ser generados, no atraviesan por un proceso cíclico y regresan al ambiente para su deterioro.

El propósito del Metabolismo Urbano es relacionar las actividades económicas que realiza una ciudad con los flujos materiales y energéticos necesarios para llevar a cabo estas actividades. A partir de esta relación será posible determinar si es necesario cambiar aspectos de su metabolismo sin producir cambios perniciosos en el medio ambiente o en los ecosistemas más cercanos (Ferrão y Fernandez, 2014).

El metabolismo urbano puede ser analizado en términos de cuatro ciclos fundamentales: agua, materiales, energía y nutrientes, (Kennedy, 2007). Las diferencias entre ciudades se pueden reconocer debido a la edad, desarrollo y otros factores culturales. Otras diferencias pueden ser asociadas con el clima o la densidad urbana.

Para lograr la sostenibilidad es necesario que haya un amplio entendimiento de lo que implica este análisis, las herramientas de la ecología industrial se encargarán de facilitar este entendimiento. Entonces, aquellos encargados de generar políticas deben estar alentados a entender el MU de las ciudades, evaluar cuál de los recursos está más cercano a acabarse, y si es necesario, considerar estrategias apropiadas para evitar la explotación y consumo excesivo. El objetivo de utilizar herramientas pertenecientes a la Ecología Industrial es ofrecer métodos científicos y modelos que provean indicadores para usar como guías que permiten que creadores de políticas e individuos procedan sin errores frecuentes.

3.7 Análisis de Flujo de Materiales

Los requerimientos metabólicos de una ciudad pueden ser definidos como “todos los materiales y activos necesarios para sostener a los habitantes de una ciudad en sus hogares, trabajos y para recrearse” (Wolman, 1965). El Análisis de Flujo de Materiales (AFM) es una herramienta bastante útil y la más utilizada (Beloint-Saint-Pierre et. al, 2016) para medir estos requerimientos, cuyo propósito incluye la gestión del espacio ambiental y el buen uso de recursos.

El propósito del AFM es lograr entender a nivel de sistema cómo funciona una ciudad, región, o nación por medio de la medición del material que entra y sale del sistema. Ayres y Kneese (1969), un economista y un físico, presentaron la primera versión del MFA de economías nacionales. El argumento base consistía en que la economía se basa en bienes ambientales que no tienen precio tales como aire y agua, y bienes que son escasos. La falla de la economía consiste en percibir los procesos de producción y el consumo como diferentes a la ley de la conservación de la masa. Se considera la contaminación ambiental como un problema de balance de materiales en la economía.

El AFM consiste en un conteo de flujos específicos en un sistema definido, según la primera ley de la termodinámica, los inputs (elementos que ingresan al sistema) deben ser iguales a los outputs (elementos que salen del sistema). Los elementos que se mantienen dentro del sistema se consideran como *stock*. El modelo más simple de análisis de flujo de materiales a nivel de economía nacional es el modelo de relación entre la economía y el ambiente, en el cual la economía es el subsistema implantado del ambiente y depende de su intercambio de materiales y energía. Materiales brutos, agua y aire son extraídos del sistema natural o importados de otros orígenes como insumos, transformado en productos o transferidos al sistema como outputs (Kennedy, 2007).

El AFM es una plataforma que puede ser utilizada para el análisis de interacciones económico-ambientales y orientarlo a políticas públicas. Según Fisher-Kowalski (2011), La utilidad de esta herramienta se presenta de las siguientes maneras:

Como existe una relación cercana entre el PBI y el consumo de materiales, la herramienta permite monitorear el progreso para la escisión de recursos, lo cual posibilita el crecimiento económico sostenible.

Con datos cronológicos para el uso de material disponible, es posible realizar análisis históricos en el desarrollo de ciertos impactos medioambientales en países de la economía mundial, como por ejemplo, el crecimiento económico es asociado con el uso creciente de materiales, y el intercambio del uso de energías renovables a no renovables.

Las transiciones metabólicas (cambios en la escala y composición del uso de material sobre el tiempo), pueden ser sondeadas y relacionadas al desarrollo económico. Con la ayuda de modelos genéricos, el consumo nacional material puede ser analizado en un contexto global.

Otra aplicación del análisis de flujo de materiales es el uso de modelos económicos que permiten la combinación de información del uso de material con datos de otros recursos naturales.

3.8 Tendencias Actuales del Metabolismo Urbano

a. Modelo Lineal de Análisis de Flujo de Materiales

Es el modelo más simple de trabajo de AFM. Se basa en el principio de Ayres y Kneese (1969), en la cual la economía está adherida físicamente al ambiente, siendo la economía un sistema abierto.

En el análisis de economías nacionales, las actividades que suceden dentro de esta no son conocidas. Solamente los flujos que cruzan los límites del sistema hacia otras economías son consideradas pero no los flujos que ocurren dentro de esta.

En este caso, el modelo simplificado requiere el conteo de *inputs*, que generalmente consisten en agua, aire, recursos abióticos y bióticos (biomasa, combustibles fósiles, minerales, bienes producidos y energía); y el conteo de *outputs* (residuos, sustancias, bienes). No se especifica el estado de los flujos internos, principalmente por la complejidad de estos, y por la cantidad de información disponible. A partir de estos se puede comparar estos flujos respecto al promedio de otras regiones urbanas, pero no es lo suficientemente profundo para poder analizar problemáticas

internas o llegar a conclusiones nucleares para la toma de decisiones aplicadas a políticas de gestión de recursos.



Figura 2. Modelo básico de AFM. Fuente: Adaptado de Hammer et. al, (2003).

Este análisis es frecuentemente utilizado para aquellos estudios que no tienen la suficiente información disponible ya sea porque las instituciones gubernamentales no han realizado los estudios necesarios, característica común en países en vías de desarrollo, o para estudios combinados, en las que se utilizan dos o más herramientas de la ecología industrial (Análisis de Ciclo de Vida y Análisis de Flujo de Materiales, por ejemplo).

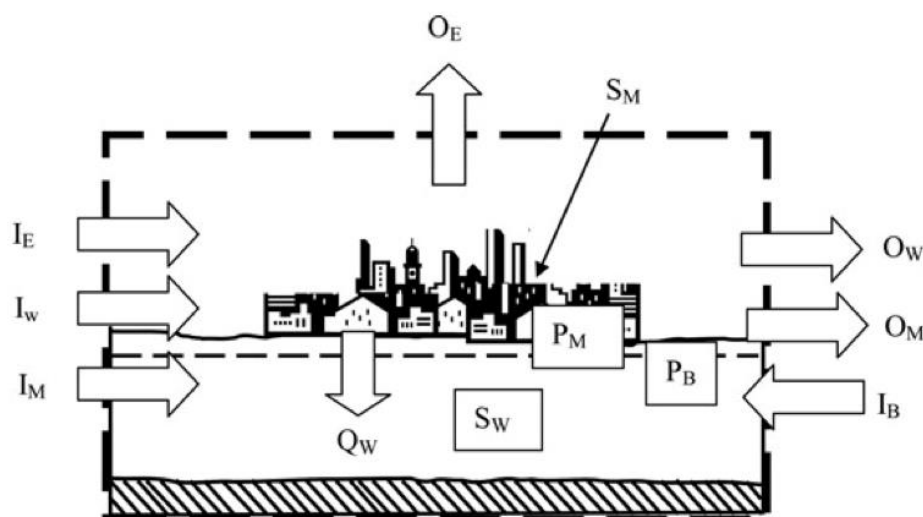


Figura 3. Modelo de trabajo de metabolismo urbano, se muestran los Flujos de Entrada (I), Flujos de Salida (O), Flujos Internos (Q), Almacenamiento (S) y Producción (P) de Biomasa (B), Minerales (M), Agua (W) y Energía (E). Fuente: Adaptado de Kennedy (2007).

Este modelo fue afianzado en un *workshop* organizado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts junto con el Banco Mundial (BM) en el 2010, con el propósito de estandarizar un espacio de trabajo específico para ciudades clientes del BM y con el apoyo de la Sociedad Internacional de Ecología Industrial para la difusión de esta metodología a otros estudios académicos del mismo tipo.

En este caso, los límites propuestos del sistema son definidos administrativamente, porque se asume que la recolección de datos es realizada por los gobiernos locales debido a que estos tienen injerencia directa en su jurisdicción, además las estadísticas nacionales están formuladas y administradas por regiones locales (departamentos, provincias, distritos).

Se realizó una lista de inputs y outputs tomando en cuenta los problemas más importantes de las ciudades en cuanto se refiere a manejo de recursos y considerando la frecuencia de disponibilidad de datos que existen en las ciudades.

Tabla 2. Catálogo de materia a considerar para el análisis. Fuente: Kennedy (2007).

Flujos de Entrada (Unidad)
Biomasa (t & J): Alimentos, Madera.
Combustibles Fósiles (t & J): Transporte, Calefacción/Industrias.
Minerales (t): Metales, Materiales de Construcción.
Electricidad (kWh)
Energía natural (J)
Agua (t): Potable (superficie y subterránea), Precipitación.
Sustancias (t): Nutrientes
Bienes producidos (t)

Producción (Unidad)
Biomasa (t & J)
Minerales (t)

Stocks (Unidad)
Infraestructura/Edificios (t): Materiales de Construcción, Metales, Madera, Otros Materiales.
Otros (maquinaria, bienes duraderos) (t): Metales, Otros materiales.
Sustancias (t).

Flujos de Salida (Unidad)
Residuos (t): Gases, Sólidos, Desagüe, Otros líquidos.
Calor (J)
Sustancias (t)
Productos (t)

b. Modelo de Economías Europeas: EUROSTAT

La Oficina de Estadística de la Unión Europea (EUROSTAT) realizó una guía metodológica a partir de uno de los temas de agenda del Consejo Europeo, para esto

se reunió en Helsinki en 1999. En el punto de agenda se trató de comprender que los recursos naturales son finitos y cómo las economías dependen de estos. El año siguiente se presentó una guía metodológica de Análisis de Flujo de Materiales para economías europeas (2001). El propósito de esta guía es uniformizar el uso de términos y conceptos para la región. Una serie de publicaciones, siendo cada una la revisión y/o extensión de los anteriores, tuvieron como propósito uniformizar el uso de términos y conceptos en la región: El SEC (Instituto de Ecología Social) de Viena produjo una versión extendida y revisada de la guía inicial. Luego, una guía con una serie de indicadores actualizados fue publicada con la colaboración del instituto Wuppertal.

El modelo básico de AFM, se basa en la Primera Ley de Termodinámica. Para cualquier sistema socioeconómico, el balance de material tiene guía en esta identidad:

$$\text{Total de Inputs} = \text{Total de Outputs} + \text{Acumulación neta}$$

Para cada flujo, el balance de material se expresa como: origen = destino. También puede ser oferta = demanda, recurso = utilidad.

En este modelo se indica que se analizarán los inputs y outputs al ambiente y a otras economías. Se menciona en la guía que un análisis completo de los flujos a considerar es difícil de conseguir dado que no todos los flujos son analizados de manera sistemática. Algunas categorías de flujos son estimadas y complementadas con datos adicionales.

Esta metodología categoriza a los flujos de materia e indicadores en tres dimensiones:

- 1) La dimensión territorial, que determina el origen y destino de flujos: Doméstico – Resto del Mundo.
- 2) La dimensión de ciclo de vida que indica que los flujos son analizados directamente o requieren de cálculos de materiales indirectos: Directo – Indirecto.
- 3) La dimensión que indica si los flujos ingresan a algún sistema económico o no: Utilizado – No Utilizado, para *inputs*; y procesado – no procesado, para *outputs*.

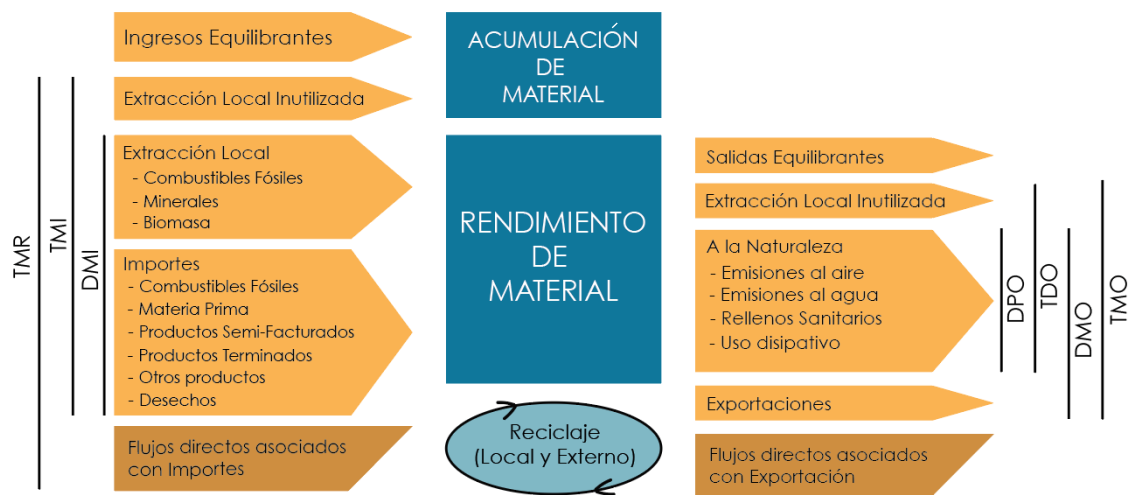


Figura 4. Esquema de balance material nacional. Fuente: Adaptado de EUROSTAT (2001).

Las primeras dimensiones son características de los flujos de ingreso (*inputs*), en estas se marcan ciertas distinciones, la primera es aquella que define los flujos utilizados y no utilizados, en la cual los elementos utilizados son aquellos recursos extraídos que entran en el sistema económico para su posterior proceso y consumo, tienen un valor económico y también se pueden considerar como activos. Materiales inutilizados con aquellos que son extraídos de la naturaleza pero nunca entran al sistema socioeconómico por su mismo uso.

La segunda distinción es aquella entre flujos directos e indirectos. Los flujos directos refieren a la masa misma del material o producto y por ende no es necesario considerar otros requerimientos materiales en la cadena de producción. Los flujos indirectos son aquellos materiales requeridos para que una cadena de producción manufacture un producto. Es por ello que estos flujos son considerados “ocultos”. Es importante saber el grado de impacto que posee factualmente un material o producto en cuanto a su producción.

Asimismo, para los flujos de salida (*outputs*), se muestra una distinción. Aquellos flujos procesados son aquellos que han pasado por cambios en el sistema y por ende no poseen las mismas propiedades que su estado inicial. Los flujos no procesados son aquellos flujos existentes extraídos dentro del sistema que no han sufrido proceso alguno, pero son inevitables para la existencia de otros materiales.

Tabla 3. Resumen de la terminología para categorías de ingreso y salida de materiales. Fuente: Adaptado de EUROSTAT (2001).

Cadena de producción	Utilizada/procesada – No Utilizada/No Procesada	Doméstica – Resto del Mundo	Términos del EUROSTAT
Directa	Utilizada	Doméstica	Extracción doméstica utilizada
	Inutilizada	Doméstica	Extracción doméstica Inutilizada
Directa	Utilizada	RdM	Importes
Indirecta	Utilizada	RdM	Flujos indirectos asociados a importes
Indirecta	Inutilizada	RdM	
Directa	Procesada	Doméstica	Output doméstico procesado hacia la naturaleza
	No-procesada	Doméstica	Reserva de extracción doméstica inutilizada
Directa	Procesada	RdM	Exportaciones
Indirecta	Procesada	RdM	Flujos indirectos asociados a exportaciones
Indirecta	No-procesada	RdM	

Los inputs materiales directos son aquellos materiales sólidos, líquidos y gaseosos que entran en la economía para su posterior uso, ya sean procesos de producción o consumo. Son clasificados según su origen en Extracción Doméstica Utilizada e Importes. Estos materiales pueden ser de tres tipos: Combustibles Fósiles, Minerales, y Biomasa.

La Extracción Doméstica Inutilizada comprende tres grandes grupos. El primero consiste en la extracción inutilizada proveniente de la minería (materiales necesarios para producir minerales pero que no son utilizados por ejemplo Pirita este mineral se desecha al extraer el Cobre nativo). El segundo componente es la extracción externa de la cosecha de biomasa. El tercero se compone de excavación de rocas y suelo necesarios para ciertas actividades (construcción y minería metálica).

Aunque el aire no es tratado como un insumo, es útil estimar la demanda de oxígeno y nitrógeno de ciertos procesos para asegurar el balance, por ello existe el input de aire. Ambos gases (oxígeno y nitrógeno) aparecerán como ítems para el balance de los inputs y outputs. Se clasifican en oxígeno para la combustión de petróleo y derivados, oxígeno para la respiración en humanos, y nitrógeno para balancear los NO_x (Óxidos de Nitrógeno) de la combustión.

La extracción doméstica inutilizada refiere a aquellos materiales que al ser procesados, no forman parte de la cadena de suministros. Dígase de la grava remanente después de la respectiva selección granulométrica para uso en el concreto simple o armado, la grama restante de cultivo, el cual solo una parte es procesada para ser alimento. Los flujos indirectos asociados a importes refieren a la totalidad de material requerido necesaria para manufacturar todos aquellos productos que se importan, pero que no logran entrar al sistema definido.

Los outputs al ambiente son todos aquellos flujos de materia que entran al medio ambiente, durante o después de sus procesos de producción o consumo. Se clasifican en outputs procesados y no procesados, Los outputs no procesados corresponden a la disposición de la extracción inutilizada. Los outputs procesados son el resultado de la producción o procesos de consumo, pueden ser aquellas emisiones (al aire o agua), residuos sólidos, o las pérdidas por uso de productos. Las exportaciones son clasificadas de la misma manera que los importes.

A partir de la selección de información, se determinarán los siguientes indicadores para inputs y outputs. El Input Material Directo (DMI) refiere al input directo de materiales para el uso de la economía, todos aquellos materiales de valor económico utilizados en actividades de producción y consumo.

$DMI = \text{Extracción Doméstica Utilizada} + \text{Importes}$

El Input Material Total (TMI) incluye, además del DMI, la extracción doméstica inutilizada.

$TMI = DMI + \text{Extracción Doméstica Inutilizada}$

El Requerimiento Total de Materiales (TMR) incluye, en adición al TMI, los flujos materiales indirectos que son asociados a importaciones pero que se producen fuera del sistema.

$TMR = TMI + \text{flujos indirectos asociados a importes}$

El Consumo Material Doméstico (DMC) utiliza la cantidad total de material utilizado en una economía.

DMC= Extracción Doméstica Utilizada – Exportaciones

El Consumo Material Total (TMC) cuantifica la cantidad total de material asociada con las actividades de consumo y producción, incluyendo flujos indirectos.

TMC = Extracción Doméstica + Importes + Flujos Indirectos Importados.

El Balance Físico de Intercambio (PTB) cuantifica el superávit o déficit de intercambio físico de una economía.

PTB =Importes – Exportaciones

Las Adiciones Netas al Stock (NAS) cuantifican el crecimiento físico de la economía, este puede ser la cantidad de materiales de construcción nuevos agregados o materiales incorporados a bienes durables como maquinaria industrial, o automóviles.

El Output Doméstico Procesado (DPO) determina el peso total de materiales, extraído del medio ambiente local o importado, el cual ha sido utilizado en la economía doméstica, antes de regresar de nuevo al medio ambiente.

DPO= Emisiones y Residuos Uso Disipativo de Productos y Pérdidas

El Output Doméstico Total (TDO) representa la cantidad total de outputs causado por la actividad económica.

TDO = DPO + Residuos Provenientes de la Extracción Doméstica Inutilizada

El Output Material Directo (DMO) indica la cantidad total de material que deja la economía después de su uso hacia el medio ambiente o el resto del mundo.

DMO= DPO + Exportaciones

El Output Total Material (TMO) indica la cantidad de materia que sale de la economía.

TMO=TDO + Exportaciones

Uno de los atributos de esta guía es la clasificación de cada insumo o flujo, sea de entrada o salida. Indica por categorías y subcategorías los inputs y outputs respectivos. Esto es muy útil para realizar un análisis, dado que usualmente los autores utilizan un criterio de cada flujo o solamente indican flujos principales.

c. El Metabolismo de la Antropósfera: Brunner – Rechberger

Paul Brunner y Helmut Rechberger (2003), ambos con experiencia en el ámbito de la ecología industrial, desarrollaron una guía para el Análisis de Flujo de Materiales aplicado a varias disciplinas, no sólo a sistemas urbanos sino a: Gestión Ambiental, Gestión de Recursos, Gestión de Recursos Hídricos, etc. Asimismo, el objetivo de esta guía es uniformizar el uso de AFM para que exista un método común de estudio.



Figura 5. Los dos sistemas, "antropósfera" y "medio ambiente", y su intercambio de flujos. Fuente: Brunner P., Rechberger H. (2003).

Ellos, ilustran sistemas que contienen más allá de flujos materiales y reservas elementos antropogénicos. Espacio, información, energía y problemas socioeconómicos son parte de la Antropósfera. Asimismo, esta forma parte del planeta Tierra, y puede considerarse como un organismo viviente. Los procesos físicos en los ecosistemas naturales tienen como análogo en la Antropósfera la extracción, transporte y almacenamiento de sustancias, y su transformación dentro de ella.

Según los autores, la Antropósfera se divide en cuatro compartimentos: Agricultura, Industria y Comercio, Consumo Doméstico, y Gestión de Residuos. Estas áreas interactúan con el medio ambiente a través de la extracción de recursos (agua, aire, minerales) y emite productos y residuos.

En la metodología de este modelo, los autores definen los términos y sus definiciones respectivas (Brunner & Rechberger, 2003):

La *sustancia*, es aquel “elemento compuesto de unidades uniformes, posee una constitución única e idéntica, y por lo tanto, homogénea”. En el AFM, los elementos químicos y los compuestos son considerados como sustancias, y estas tienen que ser conservativas (no son destruidas/transformadas en un proceso).

El *bien*, a las “entidades económicas de materia con un valor, positivo o negativo”. Se consideran bienes a la mercadería, que está relacionada con los bienes con valor económico positivo, y productos, que definen la causante de un proceso o reacción.

La *materia*, comprende aquellos elementos constituyentes, sustancias de algo que se puede componer o construir, o sea, integra los conceptos de sustancia y bien.

El *proceso*, se considera como la “transformación, transporte, o acumulación de materiales”. Esta transformación se produce a través de las actividades de una economía a partir de los procesos primarios de producción y procesos de consumo como aquellos domésticos, que transforman bienes en residuos o emisiones. La mayoría de procesos son definidos como procesos de “caja negra”, porque todas aquellas actividades que se producen dentro de esta caja no se toman en cuenta, solo los inputs y outputs. La única excepción a este principio es el proceso de acumulación, cantidad que permanece en el sistema.

El flujo (*Flow* y *Flux*), es el intercambio de materiales determinado por un sistema se considera como flujo (*Flow*). Elementos específicos relacionados a una sección son designados como flujos (*Flux*). La ventaja de utilizar *Fluxes* es que se puede comparar entre varios procesos y sistemas, porque son valores específicos.

El *coeficiente de transferencia*, está definido como la “partición de una sustancia en un proceso”. Aplicado para cada bien que sale del sistema, consecuencia de un proceso. Cada coeficiente da el porcentaje de la sustancia que ha sido transferida a un proceso (partición). La suma de todos los coeficientes es igual a 1.

Las actividades conciben la idea que en todos los sistemas socioeconómicos existen necesidades básicas para los habitantes de esta: alimentarse, respirar, residir, comunicar. La prosperidad de las economías depende de cuan eficientemente se satisfagan estas necesidades. Es por ello que para facilitar el análisis, se definirán

las siguientes actividades: Alimentar, limpiar, residir/trabajar, transportar/comunicar. Todos los procesos se identificarán con algunas de estas necesidades.

El *sistema y límites del sistema* son definidos por la separación de los objetos de estudio y otros elementos que no se consideran, esta separación implica una relación entre los componentes dentro del sistema. Puede aplicarse con criterios de tiempo y espacio.

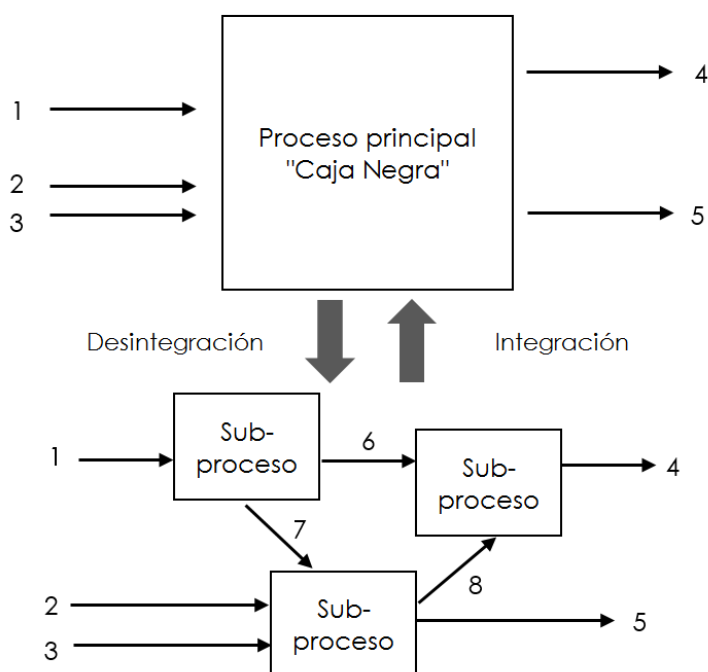


Figura 6. Para tener más información de la "caja negra" es necesario subdividir los procesos dentro de esta. Fuente: Adaptado de Brunner P., Rechberger H. (2003).

d. Urban Metabolism Analyst Model (UMAn)

Rosado, Niza y Ferrão (2014), identificaron varios problemas recurrentes en el desarrollo de estudios de AFM a regiones urbanas. Según ellos, el problema principal es la "falta de una metodología unificada", la cantidad de metodologías producidas en estos últimos 30 años, y su respectiva aplicación a sistemas urbanos reales afectan la validez de los resultados de manera que la comparación se basa en criterios poco aproximados entre sí y bajo cada contexto propio.

El segundo problema, que depende del primero, es la falta de información. Es común observar que en el análisis de los patrones y las tendencias de los estudios se encuentren información incompleta, o se adapta los valores a escala nacional. Esto es porque no existe suficiente información personalizada para cada ciudad.

Varios autores observan que la sobre-categorización de materiales en un estudio de AFM se considera un problema, dado a que la utilidad de los estudios depende de cuantos flujos son considerados, y para que propósito, el tener demasiados flujos puede llegar a confusiones al momento de comparar resultados. Otro problema se encuentra en los indicadores de consumo, que tienden a ser muy generalizados y no permiten llegar a conclusiones acerca de aquellos sectores que lideran el consumo de materiales. La falta de entendimiento del origen y el destino de los flujos en los límites urbanos es el quinto problema. El cambio de las reservas/stocks en el tiempo no se considera en los estudios de AFM, la dinámica de consumo-desecho permite identificar la disponibilidad de materiales a futuro.

El último problema identificado es la falta de comprensión sobre aquellos flujos generados a partir de elementos (personas, vehículos) que no pertenecen al sistema, sino que atraviesan esta para llegar a otro destino.

El modelo propone la solución a estos problemas. Respecto al primero, propone establecer un catálogo de 28 tipos de materiales. Posteriormente, desagrega la información especialmente y por sector económico, caracterizando el ciclo de vida de productos. Por otro lado, incluye información acerca de la edad de los productos. Finalmente, separa los flujos pasajeros con importes y exportaciones para entender mejor sus magnitudes de producción industrial local.

El modelo UMAN tiene cuatro componentes principales en las cuales la información es producida mediante rutinas de cálculo.

El primer componente se denomina plataforma, cuyo propósito es ajustar los modelos hechos a partir del AFM de economías nacionales a escalas urbanas. Los importes, ya sean provenientes del mismo país, o importes internacionales son relevantes para el análisis específico de las regiones urbanas.

El segundo componente corresponde a aquellos datos estadísticos necesarios para realizar los procedimientos de *plugins* y calculadora. En este modelo, estos datos provienen de la Clasificación Estadística de Bienes Estándares (SGCTS) del EUROSTAT.

El tercer componente, denominado *Plugins*, se encarga de inventariar los flujos de los productos y bienes en base a su composición y características propias del elemento. También se identifican el tiempo de vida y ciclo de vida. Los *plugins* se consideran de tres tipos.

Composición de Material: Balance entre la nomenclatura generada por el EUROSTAT (2001) y por una clasificación basada en gestión de recursos. La matriz generada para esto es:

$$M_{n,m} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,m} \\ m_{2,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & m_{n-1,m} \\ m_{n,1} & m_{n,2} & m_{n,m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $n = 1, \dots, n$ tipos de productos y $m = 1, \dots, m$ categorías de material.

Periodo de vida del producto: Esta base de datos determina el tiempo de vida (en años), esta se representa bajo la siguiente ecuación.

$$f(x, \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

En donde x es la edad de un producto y λ, k son los parámetros de escala y forma para la curva de distribución.

A partir de allí se obtiene la matriz T.

$$T_{n,y} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & t_{1,x} \\ t_{2,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & t_{n-1,x} \\ t_{n,1} & t_{n,2} & t_{n,x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde $n = 1, \dots, n$ tipos de productos e $y = 1, \dots, x$ categorías de material.

Fase de ciclo de vida: Productos y materiales que son procesados mientras atraviesan el sistema sufren transformaciones

La matriz de estos productos se define como:

$$S_{n,g} = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,g} \\ s_{2,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & s_{n-1,g} \\ s_{n,1} & s_{n,2} & s_{n,g} \end{bmatrix}$$

donde $n = 1, \dots, n$ tipos de productos e $g = 1, \dots, 5$ categoría de fase del ciclo de vida del producto.

El cuarto componente denominado calculador, utiliza los otros tres componentes. Consiste en cuatro pasos, necesariamente secuenciales: Balance de materiales, rendimiento en el tiempo, distribución por actividad económica y distribución espacial. Para el balance de materiales se utilizó la siguiente nomenclatura:

$$DMC_{nst} = DE_{nst} + IMP_{nst,int} + IMP_{nst,nat} - EXP_{nst,int} - EXP_{nst,nat} \quad (4)$$

DMC= Consumo doméstico

DE= Materiales extraídos dentro del sistema

IMP_{int}= Materia importada de origen internacional

IMP_{nat}=Materia importada de origen nacional

EXP_{int}=Materia exportada con destino internacional

EXP_{nat}=Materia exportada con destino nacional

El DMC_{nst} es el consumo doméstico que depende de flujos de producción nacional e internacional (importaciones/exportaciones). Luego se determina el flujo por tipo de producto (se consideran 13135 tipos), y se utiliza una matriz para determinar los tipos de productos en diferentes ciclos de vida.

$$DMC_{sp,n,g} = DMC_{n,n} \times S_{n,g} \quad (5)$$

S_{n,g} = matriz de caracterización de ciclo de vida

Identificando vacíos en información para establecer el consumo final, los bienes producidos dentro del sistema, y aquellos flujos por doble conteo, se encuentra la siguiente ecuación de balance.

$$DE_n = IMP_{it_n} + IMP_{nt_n} - EXP_{ip_n} - EXP_{nt_n} - E = 0 \quad (6)$$

DE = extracción doméstica

IMP_{it_n}= Importaciones intranacionales

IMP_{nt_n}= Importaciones internacionales

EXP_{ip_n} = Exportaciones intranacionales

EXP_{np_n} = Exportaciones internacionales

Por último, se multiplica la matriz de consumo de bienes finales con la matriz de composición material con el fin de dividir el consumo entre las 28 categorías de materiales.

$$MC_{sp_{z,m}} = DMC_{f,g} \times M_{z,m} \quad (6)$$

El rendimiento en el tiempo, consiste en que el consumo DMC distribuido en 28 materiales, se consigue multiplicando la matriz de consumo con la matriz de rendimiento $T_{z,y}$.

La distribución por actividad económica, es otro indicador definido por la distribución de productos del sector económico, que es una matriz definida por los productos finales y las actividades económicas en las que son utilizadas.

$$AD_{z,c} = \begin{bmatrix} ad_{1,1} & ad_{1,2} & ad_{1,c} \\ ad_{2,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & ad_{z-1,c} \\ ad_{z,1} & ad_{z,2} & ad_{z,c} \end{bmatrix}$$

con $z = 1, \dots, z$ tipos de productos finales y $c = 1, \dots, c$ actividades económicas.

Se multiplica la matriz de flujos de consumo $DMC_{f,g}$ para la apropiada distribución de los flujos.

$$EA_{z,c} = DMC_{f,g} \times AD_{z,c}$$

El último parámetro calculado es la distribución espacial, que expresa una distribución de flujos en el sistema urbano de acuerdo a una zonificación basada en actividades económicas. Esta zonificación está relacionada con la cantidad de trabajadores y la actividad económica que realizan.

$$SD_{c,sa} = \begin{bmatrix} sd_{1,1} & sd_{1,2} & sd_{1,sa} \\ sd_{2,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & sd_{c-1,sa} \\ sd_{c,1} & sd_{c,2} & sd_{c,sa} \end{bmatrix}$$

sa = áreas zonificadas en el sistema urbano, c= actividades económicas

Finalmente se consigue la matriz distribución por sub-área ($MSD_{z,sa}$) se obtiene mediante la multiplicación de la matriz de consumo y la distribución espacial.

$$MSD_{z,sa} = EA_{z,c} \times SD_{c,1}$$

e. Sistema Socio-Ecológico Infraestructural (SEIS)

El SEIS es un modelo diseñado para el estudio de Sistemas Urbanos Sostenibles, propuesto por el programa de Infraestructura Urbana Sostenible de la Universidad de Colorado, Denver, USA (Ramaswami, et. al, 2012). Su objetivo es lograr el trabajo interdisciplinario y el estudio de los sistemas urbanos que involucran la relación entre el sistema natural, infraestructura urbana e instituciones que modelan ciertos aspectos de sostenibilidad en la ciudad.

Los autores indican que los estudios que tienen como propósito establecer indicadores para lograr ciudades sostenibles ambientalmente, eficientes y libre de contaminación también deberían señalar que es importante la comunicación entre todas sus infraestructuras a varias escalas e incorporar a las instituciones que gobiernan a estos.

Asimismo, los autores identifican los aportes de cada disciplina involucrada en el desarrollo de las ciudades, con el propósito de poder utilizar aquellos aspectos relevantes en la metodología de SEIS.

La primera disciplina es la Ecología Urbana, refiere a aquellos estudios basados en las actividades humanas, que son realizadas en las ciudades y están asociadas a flujos de agua, energía y otros químicos dentro de los límites de la ciudad. El enfoque principal de esta disciplina es considerar las actividades de los hogares como fuentes de consumo.

La segunda disciplina es el Metabolismo Urbano, se enfoca en el análisis de flujo de materiales y energía entre los límites de la ciudad y la naturaleza que lo rodea. Solo consideran a la infraestructura dentro de los límites de la ciudad y no fuera de esta, lo que implica que la energía asociada a la producción de material importado no es considerada, y no se puede estimar el impacto a escala global.

El Uso de Recursos Urbanos y Contaminación se considera como una combinación de Metabolismo Urbano y Análisis de Ciclo de Vida de todos los sistemas de producción, lo que permite expandir el campo de estudio hacia afuera del sistema. Los Sistemas Socio-Ecológicos asociados a Asuntos Públicos. Los sistemas urbanos, a diferencia de los sistemas naturales, son más complejos, porque utilizan recursos ubicados a grandes distancias y que son conectados a través de

infraestructura de gran escala. Por ello, es importante cuestionar como los actores sociales asociados con las infraestructuras urbanas pueden gobernar las ciudades y administrar los recursos para lograr objetivos sostenibles.

El marco de trabajo del SEIS incluye:

- Utilizar el concepto unificador de uso de recursos urbanos para detectar impactos ambientales a partir de diversos sectores de infraestructura.
- Integrar infraestructuras que sirven a la ciudad, e implementar estrategias para mitigar la contaminación ambiental.
- Un multiactor que describa las interacciones entre escalas de trabajo, diseñadores, operadores e individuos.

La ciudad consiste en el sistema Biofísico y Social, con características urbanas y socioculturales únicas. En el sistema biofísico, las infraestructuras transforman recursos directamente, o después de haber sido transformados, como la electricidad y gasolina, para su respectivo uso en las ciudades. El flujo de energía primaria y materiales en la ciudad produce bienes de valor agregado y contaminación, y las actividades económicas que se realizan en la ciudad dependen del nivel de educación y la población económicamente activa en la ciudad que modela el ingreso bruto a hogares.

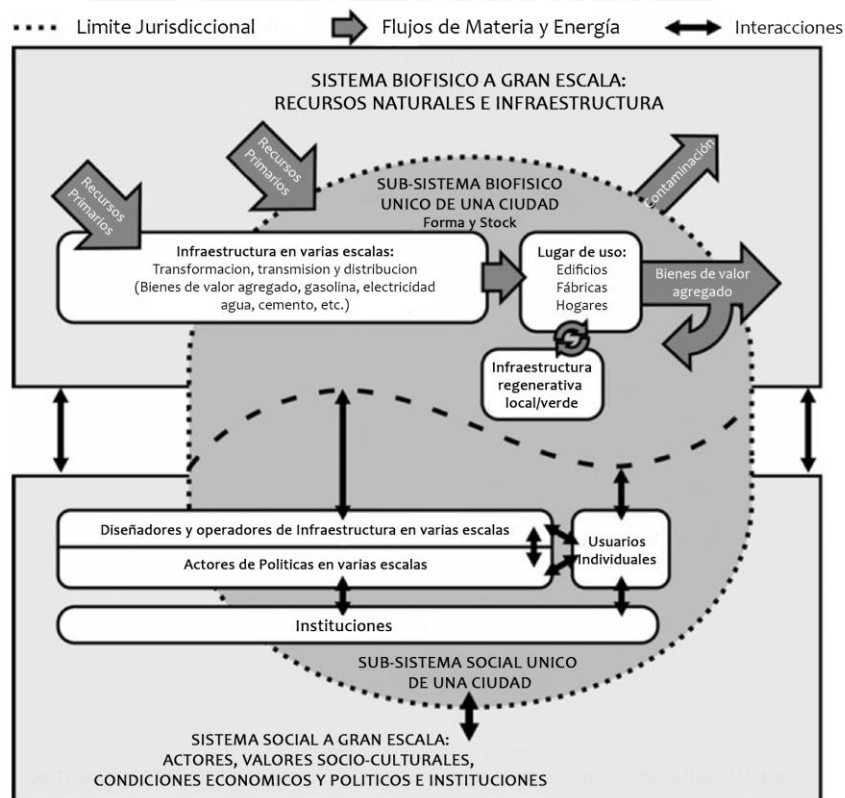


Figura 7. Representación esquemática de los sistemas socio-ecológicos infraestructurales para ciudades sostenibles. Fuente: Adaptado de Ramaswami (2012).

f. Modelo Presión-Estado-Respuesta (DPSIR).

Este modelo fue introducido por el conjunto de países de la OCDE, en base al modelo de desarrollo de indicadores ambientales (Liang y Zhang, 2011). Como cada acción realizada por el hombre hacia la naturaleza, sea positiva o negativa, causa un cambio en esta, es deber de la sociedad responder mediante políticas ambientales, sociales y económicas. Así, se retroalimenta y procede de manera circular, y continua progresivamente hasta alcanzar el bienestar de todas las partes involucradas. El modelo presenta cuatro indicadores, tres de ellas son sucesivas y cada una depende de la anterior y el otro indicador actúa a partir de los resultados del resto:

Presión, consiste en aquellas actividades o procesos que se encuentran dentro del sistema y que generan un impacto positivo o negativo. Incluye presiones directas (actividades fortuitas) o indirectas (consecuencia de presiones directas).

Estado, que describe la situación actual de los elementos, puede ser en cuestión de calidad del medio, recursos naturales o procesos socioeconómicos.

Impacto, que indica las consecuencias de la presión en todos los elementos señalados por el estado, estos involucran problemas sociales como también ambientales.

Respuesta, este indicador funciona en todos los niveles y depende de todos los indicadores, muestra el resultado de la implementación de cambios a cualquiera de los otros indicadores (Liang, 2011).

Este modelo es útil porque los procedimientos son análogos a la toma de decisiones en cualquier situación, es cercano a la forma de pensar de los actores sociales y a la comunidad científica, y por ello, se facilitaría la comunicación entre ambos.

El Análisis de Flujo de Materiales se convierte en una herramienta clave para determinar con mayor precisión aquellas presiones que se presentan en el sistema, eso implica que la definición del sistema a estudiar mediante el modelo DPSIR sea el mismo que se utilizara para el AFM. El sistema urbano puede ser delimitado por contextos geográficos o políticos. La presión en un sistema urbano consiste en identificar aquellas actividades o procesos que causan un impacto en los componentes ubicados dentro y fuera del sistema, estas actividades son aquellas

mismas que el AFM define como indicadores: Generación de residuos, consumo de recursos, producción a partir de materia prima, reciclaje, uso del territorio y emisiones.

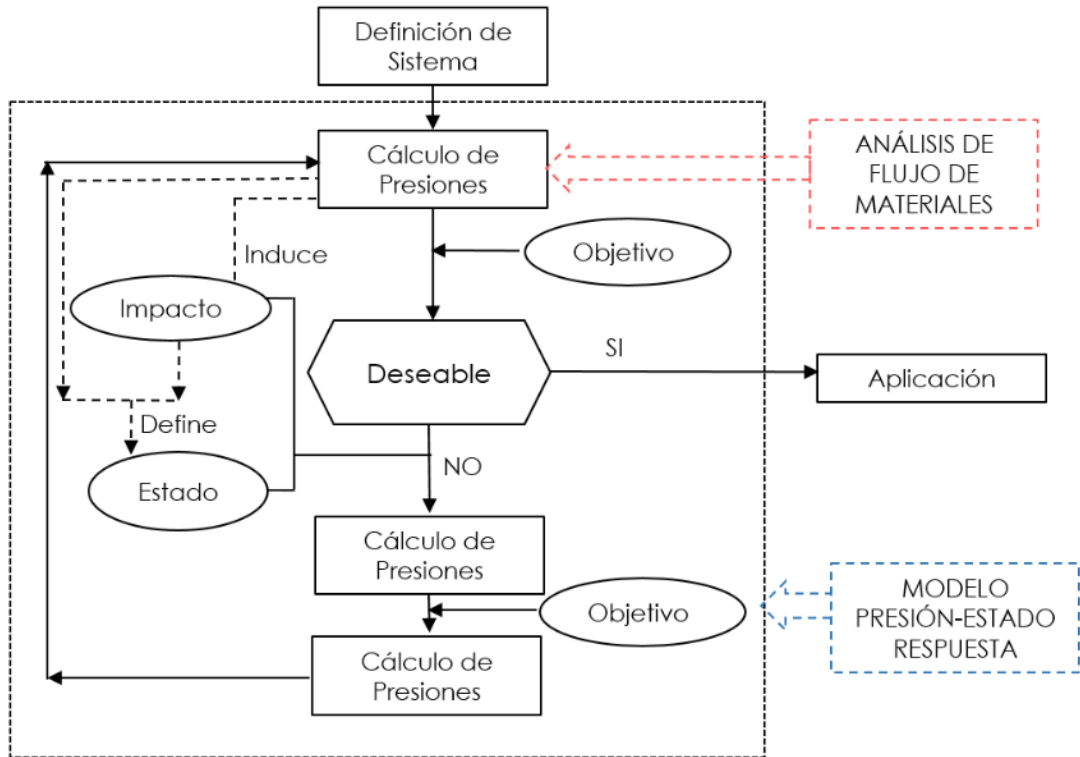


Figura 8. Plataforma de estudio de metabolismo urbano según el modelo PER.
Fuente: Adaptado de Liang, 2011.

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE ESTUDIOS Y SELECCIÓN DE INDICADORES

El análisis metabólico de una ciudad implica conocer ciertos aspectos biofísicos y sociales, establecer objetivos específicos con el propósito de buscar la sostenibilidad de los sistemas urbanos, tomando en cuenta las actividades humanas y la relación con su infraestructura.

En el ámbito del Metabolismo Urbano, se han desarrollado varios estudios, entre artículos científicos, guías e informes, que se enfocan en ciudades o zonas urbanas ubicadas dentro de una economía nacional. En un análisis a escala nacional los límites del sistema son geopolíticos, todas las actividades que ocurren dentro del país son incluidas en el análisis, los flujos de materia que ingresan y se retiran del sistema son productos para consumir, los residuos quedan dentro del sistema (tal vez con la excepción de Suecia, que importa residuos de otros países para solventar su

consumo energético). En el análisis de una región o ciudad, el sistema es más complejo pues depende de actividades que ocurren fuera del sistema, los flujos internos son importantes para determinar cuáles son los problemas que generan más impacto ambiental y permite diseñar estrategias a escala local.

Se han analizado estos estudios y se han seleccionado a diez ciudades, Londres (Chambers et. al, 2002), Paris (Barles, 2009), Estocolmo (Burström et. al, 1997), Budapest (Pomázi, 2009), Hamburgo (Hammer, 2003), Bogotá (Piña, 2014), Suzhou (Liang, 2011), Limerick (Browne et. al, 2009), Los Angeles (Ngo, 2008), Bruselas (Athanassiadis, 2013), algunas con metodologías propias y otras con metodologías basadas en estándares específicos.

La elección de estos estudios está basado en los siguientes criterios:

i) Que la ciudad de estudio tenga similares características socioeconómicas. En este caso, el primer estudio que cumple con este requisito es el estudio de la ciudad de Bogotá, pues es el único estudio de metabolismo urbano realizado a una ciudad importante de la región (Latinoamérica). Asimismo, dada la importancia al aumento de la población urbana en el mundo, se consideraron aquellos estudios referentes a ciudades con más de 5 millones de habitantes, en este caso se consideraron los estudios a Londres, Paris, Suzhou y Los Ángeles.

ii) La afinidad con las metodologías explicadas en el capítulo anterior. Esto permite realizar una comparación de resultados, que es el propósito de realizar una metodología trascendental. Las investigaciones más representativas de la metodología de EUROSTAT son los referentes a las ciudades de Paris y Hamburgo. Por último, se tomó en cuenta aquellas ciudades que utilizaron el análisis de flujo de materiales como herramienta importante en sus estudios tales como en las ciudades de Bruselas, Limerick, Los Ángeles, y Budapest.

Estos estudios utilizan el análisis de flujo de materiales como herramienta principal para conseguir sus resultados, además que todos estos estudios poseen en común una serie de procedimientos.

Los procedimientos utilizados son:

4.1 Definición de Problema /Contexto Socioeconómico

Para realizar un estudio es necesario entender el contexto bajo el cual se efectúa. El estudio puede partir de iniciativas gubernamentales, instituciones públicas que forman parte del estado donde se encuentra la ciudad y tomar la decisión respectiva, también la iniciativa puede partir desde centros de investigación, cuyo propósito es profundizar en las metodologías actuales o renovar aquellas utilizadas.

Parte de este procedimiento consiste en identificar ciertas características de la ciudad. Por ejemplo considerar la región en donde se encuentra, si la ciudad pertenece a un país industrializado o en vías de desarrollo, el desarrollo de la ciudad en el contexto geográfico (dispersa o concentrada) permite identificar problemas en el consumo de energía o emisiones a la atmosfera. El número de habitantes, los que laboran, los turistas que se espera; permiten identificar de manera general patrones de consumo de alimentos o biomasa. Otro aspecto a considerar son aquellas características socioeconómicas como el PBI, empleabilidad y crecimiento demográfico. Por último, determinar si existen otros estudios similares en el país, en otra ciudad, o en la misma ciudad con diferente metodología. Esto se realiza con el propósito de obtener una idea general de la situación actual (o del año de estudio) de la ciudad.

La ciudad de París (Barles, 2009) es el área urbana más grande de Francia y una de las más importantes de Europa. El único estudio de Metabolismo Urbano realizado hasta ese entonces fue aquel realizado para la ciudad de Lille, sin embargo, solo se realizó un análisis con flujos locales relevantes. La ciudad de Londres (Chambers et. al, 2012) posee un estatus cosmopolita que atrae a 25 millones de turistas cada año, es el centro tecnológico, social y económico, dado a que el 40% del PBI del Reino Unido pertenece a esta ciudad. No existe algún estudio anterior de Metabolismo Urbano realizado en Londres.

En la ciudad de Estocolmo (Burström et. al, 1997), tampoco existen estudios previos de metabolismo urbano pero si se realizaron estudios previos de análisis de flujo de sustancias específicas como cobre, cadmio, plomo, mercurio, zinc. Este estudio permitió realizar un programa de gestión ambiental para monitorear y controlar los flujos de materia y energía. La ciudad de Budapest (Pomázi, 2009), capital de Hungría, posee el 40% del PBI del país. Se produjeron cambios demográficos

importantes a partir del año 1980. No se han realizado estudios de este tipo en el país.

La ciudad de Bogotá (Piña, 2014), es la tercera ciudad más grande de Latinoamérica. Es por ello que este estudio permitirá desarrollar un ejemplo para países en vías de desarrollo y en el contexto latinoamericano. Se han desarrollado estudios en escala nacional en países como Perú, Chile, México, Brasil (Russi et. al, 2008), sin embargo no se han realizado para escala local. Hamburgo (Hammer, 2003), realiza este estudio como parte del proyecto NEDS (Desarrollo Sostenible utilizando el contexto y simbolismo). Una característica de esta ciudad es que contiene uno de los puertos más importantes de Europa. Asimismo, otras dos ciudades también han sido analizadas bajo la misma metodología: Viena y Leipzig. Estas tres ciudades son promotoras del desarrollo sostenible.

El estudio de Metabolismo Urbano de la ciudad de Limerick (Browne et. al, 2009) fue a partir de la iniciativa del Departamento de Transporte de Irlanda con la Universidad de Limerick. Limerick es el centro urbano más importante del oeste de Irlanda. En el estudio a la ciudad de Bruselas (Athanassiadis, 2013), el propósito es comparar los datos de esta ciudad con aquellos de otros países, y el nexo entre consumo de recursos y la organización territorial socioeconómica.

La ciudad de Suzhou, ubicada al norte de Beijing, está orientada a la exportación. Tiene el tercer índice de PBI más alto de China, por sus industrias y alto ingreso salarial. La ciudad de Los Ángeles, una de las ciudades más importantes del mundo, es considerada por el autor como el peor escenario de expansión urbana. El estudio se realiza con el propósito de mostrar características ambientales y físicas de la ciudad. Existen estudios anteriores, pero la falta de información imposibilita un análisis completo.

Tabla 4. Definición de problema y el contexto socioeconómica de 10 ciudades.
 Fuente: Barles, 2009, Chambers et. al, 2002, Burström et. al, 1997, Pomázi, 2009, Piña, 2014, Hammer, 2003, Browne et. al, 2009, Athanassiadis, 2013, Liang, 2011, Ngo, 2008

CIUDAD, PAÍS	POBLACION (hab.)	MÉTODO / HERRAMIENTAS
Paris, Francia (Barles, 2009)	11.3 millones	Análisis de Flujo de Materiales (EUROSTAT)
Londres, Inglaterra (Chambers et. al, 2002)	7.4 millones	Huella Ecológica y Análisis de Flujo de Materiales
Estocolmo, Suecia (Burström et. al, 1997)	1.5 millones	Análisis de Flujo de Sustancias/ Materiales
Budapest, Hungría (Pomázi, 2009)	1.7 millones	Análisis de Flujo de Materiales.
Bogotá, Colombia (Piña, 2014)	7.47 millones	Análisis de Flujo de Materiales.
Hamburgo, Alemania (Hammer, 2003)	1.72 millones	Análisis de Flujo de Materiales con los Inputs y Outputs (EUROSTAT)
Limerick, Irlanda (Browne et. al, 2009)	86 998	Análisis de Flujo de Materiales
Bruselas, Bélgica (Athanassiadis, 2013)	1.13 millones	Se utiliza el método clásico de Análisis de Flujo de Materiales.
Suzhou, China (Liang, 2011)	6.07 millones	DPSR (Incentivo – Presión – Estado – Respuesta) y Análisis de Flujo de Materiales.
Los Ángeles, EUA (Ngo, 2008)	9.52 millones	Análisis de Flujo de Materiales

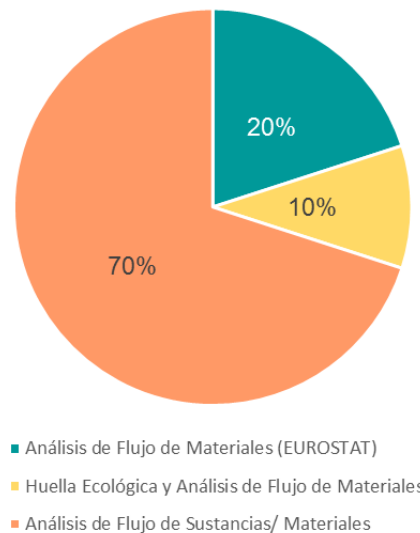


Figura 9. Distribución de estudios por metodología. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Definición de Sistema

En las bases teóricas del AFM se considera la definición del sistema como elemento importante para el análisis. Si no se realiza apropiadamente se pueden pasar por alto el funcionamiento de flujos importantes y esto puede afectar los indicadores de consumo.

Los límites del sistema pueden estar establecidos políticamente, geográficamente o infraestructuralmente, y abarca el área urbana. Hay ocasiones en donde expanden los límites para poder abarcar actividades que se realizan fuera del sistema inicial, como zonas aeroportuarias o centros de procesamiento de residuos. En esencia, el sistema debe reflejar la interacción entre el medio ambiente y la sociedad. Como esta interacción está definida por el intercambio de flujos entre actividades, mientras más se consideren, se podrá entender con mayor facilidad y detalle el metabolismo de la ciudad.

Por ejemplo, para ciudades dispersas, la cual se compone de un área céntrica densa rodeada por suburbios, se convierte en una tarea más complicada definir el sistema, pues el área dispersa es la que consume mayor energía, y no está bien establecido el límite en donde deja de ser ciudad para convertirse en las afueras o alrededores de esta. Asimismo, en las ciudades concentradas, la mayoría de actividades están distribuidas en un área menor y ello implica menos consumo de materiales y energía. Tal vez la única complicación presente implica considerar aquellas actividades que

no son cercanas a concentraciones humanas, como la trata de aguas residuales, reciclaje, zonas industriales, en este caso, se cuestiona la importancia de estas actividades, los flujos que utilizan, y a partir de ahí se determina si es necesario modificar los límites del sistema.

Es importante considerar el tiempo que comprende analizar el sistema. El procedimiento común es utilizar un año específico, recoger la información disponible y en caso no haya información el año de estudio, se adapta o ajusta según ciertos indicadores. Otro procedimiento utilizado consiste en analizar por una cantidad de años el metabolismo del sistema, así permite obtener una mayor comprensión del metabolismo por un periodo y a partir de este determinar tendencias y proyectar objetivos de cambio.

En el caso de París, se expande a toda área metropolitana que está compuesta por la región administrativa de Ile de France: París, Petite Couronne y Grande Couronne.

La ciudad de Londres es administrada por la Corporación de Londres y consiste en 34 distritos. La autoridad encargada es la Gran Autoridad de Londres (GLA). En Estocolmo los límites del sistema espacial es el borde geográfico de la unidad política y administrativa, en este caso, la Municipalidad de Estocolmo.

La ciudad de Bruselas, es una región metropolitana y ciudad a la vez, concéntrica a la región de Flandes. Conviene subrayar que el área metropolitana es mayor que la región. En el caso de Suzhou, el sistema está definido por sus límites administrativos; a pesar de que el área metropolitana sea mayor, solamente se tomaran estos límites por motivos de disponibilidad de información. El estudio de la ciudad de Los Ángeles solamente tomó en cuenta el área urbana localizada en el Condado de Los Ángeles, por cuestiones de información y estadísticas, El análisis se realizó entre los años 1990 y 2000.

En la siguiente tabla se identifican las características de la ciudad que permiten definir el sistema, estos consisten los Límites del Sistema, como estos están definidos, y se mencionará en caso que el estudio se realice en un espacio de tiempo:

Tabla 5. Definición del sistema en 10 ciudades. Fuente: Barles, 2009, Chambers et. al, 2002, Burström et. al, 1997, Pomázi, 2009, Piña, 2014, Hammer, 2003, Browne et. al, 2009, Athanassiadis, 2013, Liang, 2011, Ngo, 2008

Ciudad, País	Sistema
Paris, Francia (Barles, 2009)	Área Metropolitana, dos límites administrativos
Londres, Inglaterra (Chambers et. al, 2002)	Ciudad, límite administrativo
Estocolmo, Suecia (Burström et. al, 1997)	Ciudad, límite administrativo
Budapest, Hungría (Pomázi, 2009)	Ciudad, límite administrativo
Bogotá, Colombia (Piña, 2014)	Ciudad, límite administrativo.
Hamburgo, Alemania (Hammer, 2003)	Región metropolitana, excluye sus regiones aledañas.
Limerick, Irlanda (Browne et. al, 2009)	Ciudad y sus alrededores (limitados administrativamente)
Bruselas, Bélgica (Athanassiadis, 2013)	Región metropolitana, límites administrativos
Suzhou, China (Liang, 2011)	Ciudad, límites administrativos.
Los Ángeles, EUA (Ngo, 2008)	Área metropolitana, dos condados, dos límites administrativos.

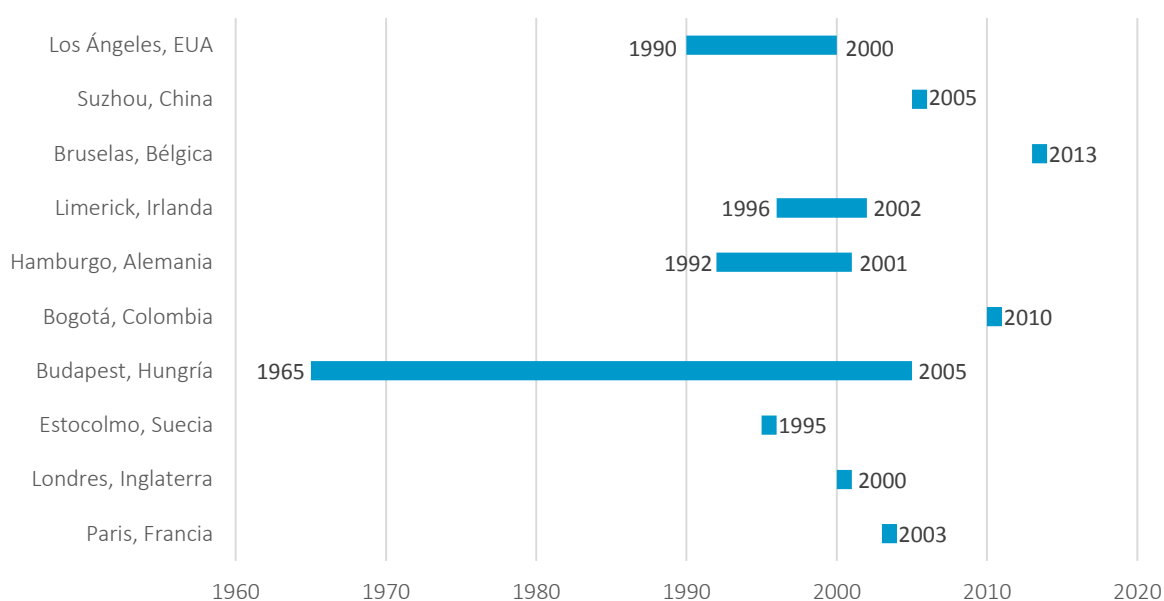


Figura 10. Tiempo de Análisis. Fuente: Elaboración Propia.

4.3 Flujos de Entrada (Inputs) y Flujos de Salida (Outputs)

La elección de los flujos del sistema se define con el propósito de conseguir los objetivos del estudio. Si el objetivo general apunta a tener una comprensión completa del metabolismo, sin tener que ahondar en el detalle de indicar cada flujo y su importancia, entonces se consideraran los flujos más abundantes o que involucran actividades económicas importantes.

Si se desea entender el impacto de un grupo de flujos en específico y su relación con otras actividades, entonces se detallarán aquellos flujos para aquellas actividades en las que participan y considerar aquellas involucradas secundariamente. Por ejemplo, para realizar un estudio de metabolismo urbano enfocándose en el impacto de los gases de efecto de invernadero, todas las actividades emiten a la atmosfera estos gases, entonces se convierte en la tarea de recolectar información para todas las actividades y ser específicos con los flujos relevantes.

Existe una guía metodológica estandarizada de ejecución de Análisis de Flujo de Materiales a nivel nacional. Esta guía, por su utilidad, ha sido adaptada y utilizada en estudios a ciudades y regiones. Aunque cada adaptación realiza una versión propia de inputs y outputs necesarios para un análisis regional/local, la clasificación contiene los mismos ítems y por ende es más sencillo comparar entre estudios que utilicen la misma categorización de flujos. El EUROSTAT es la oficina estadística de la Unión Europea, en el año 2001 generó una guía de AFM para economías nacionales en Europa utilizando un catálogo de materiales para inputs y outputs en base a los requerimientos estadísticos de la misma oficina (PRODCOM). Este catálogo especifica cómo se debe recolectar la información y cómo se debe clasificar para su respectivo análisis y cálculo de indicadores (también especificados en la guía del EUROSTAT).

Los estudios contienen el tipo de información necesaria para realizar un estudio y lo clasifican en inputs y outputs. La siguiente tabla recolecta la información en información extraída, su clasificación en inputs y en outputs.

FLUJOS DE ENTRADA

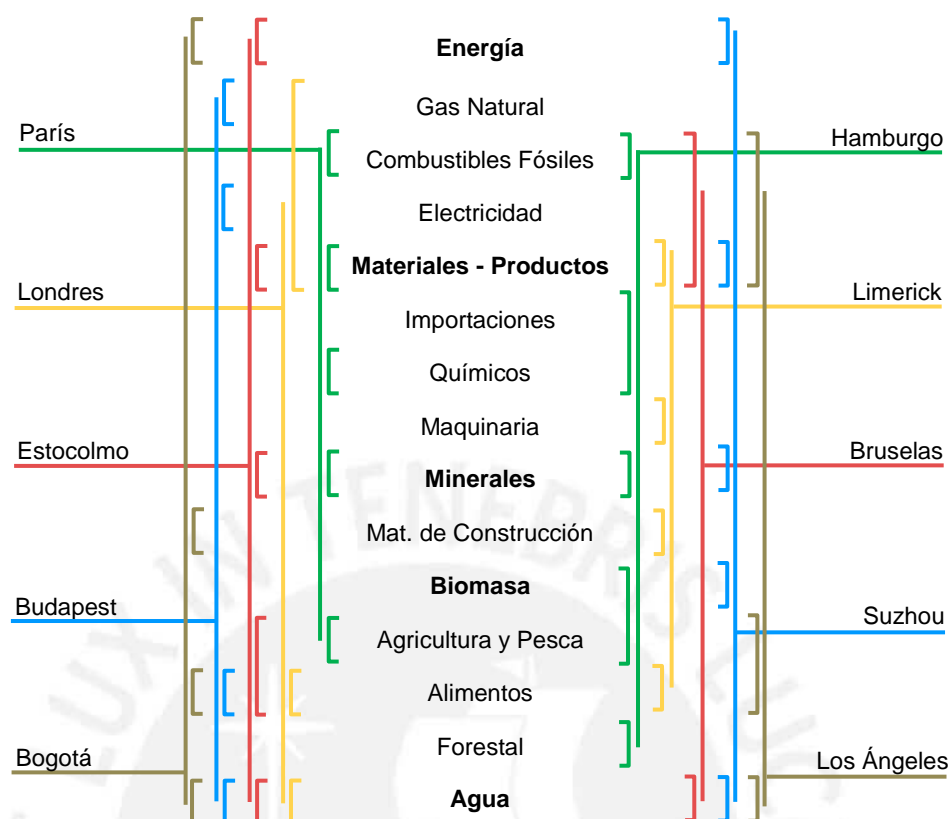


Figura 12. Flujos de entrada mencionados en estudios a 10 ciudades. Fuente: Elaboración propia.

FLUJOS DE SALIDA



Figura 13. Flujos de salida mencionados en estudios a 10 ciudades. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Indicadores

Los indicadores nos permiten asociar diferentes datos con características propias del sistema. La metodología de cada estudio permite colocar una nomenclatura a cada

uno de los elementos para poder entender mejor su rol en el sistema. En efecto, estos indicadores nos permitirán entender, mediante cálculos, resultados implícitos que no se pueden hallar al contar sólo los inputs-outputs.

Los indicadores pueden describir la manera cómo estos flujos llegaron al sistema, mostrar que tan rápido puede salir éste del sistema o la estadía en esta. De la misma manera, describe cómo estos flujos se formaron y si es necesario otros elementos que permitan que se produzca y donde se encuentran ubicados, bajo qué actividad económica se encuentra, si se extrae dentro del sistema, la cantidad total necesaria para cumplir los requerimientos metabólicos de la ciudad. Por último, describe aquellos flujos que salen del sistema para terminar en la naturaleza, o que pueden salir hacia otras economías como productos procesados dentro del sistema.

Además, se considera la relación que tiene la población y todo ámbito social con sus actividades cotidianas y la naturaleza, mediante el PBI per cápita, empleabilidad, sector económico predominante, y la eficiencia económica entre el consumo y la generación de residuos.

Algunos de los estudios generan indicadores para adaptar sus metodologías al contexto del objeto de estudio o utilizan indicadores preexistentes. Para las ciudades de París y Hamburgo se utilizaron indicadores pertenecientes a la guía del EUROSTAT, para economías nacionales. Es por ello que se tuvo que adaptar a escala regional. Por la popularidad de esta guía, se puede comparar entre diferentes escalas territoriales. Los indicadores se basan en datos nacionales y se asume que existe alguna estadística a nivel regional. Es más simple porque solamente utiliza los inputs y outputs principales y no requiere de una descripción de la circulación del material dentro del sistema, por eso no se escogió la metodología de Brunner-Rechberger, que involucra definir procesos que son más complejos para la información que se maneja.

Tabla 6. Indicadores utilizados en el caso de París. Fuente: Adaptado de Barles (2009).

INDICADORES	
BI=Inputs Balanceantes	DMC=Consumo material doméstico
BO= Outputs Balanceantes	DMC=DMI-Exportaciones
DMCcorregido=Consumo de Material Doméstico Corregido	DMI=Input de material

NAS= Adición neta al stock	DMCcorr= DMI-Residuos Importados-Exportaciones excepto Residuos
LEPO= Outputs procesados, locales o exportados	DMO=Output material doméstico
TMO=Output total doméstico	DPO=Output procesado doméstico
TMI= Input total material	TMR=Requerimiento total material

En el caso de París (Barles, 2009), se tuvo que añadir el indicador DMCcorr que representa el consumo excluyendo los residuos, como estos se procesan dentro del sistema y no se importan, añadirlos significa aumentar el consumo total per cápita, distorsionando el resultado y su posterior interpretación.

Versiones más simples del EUROSTAT han sido ejemplificadas en el caso de Bruselas (Athanassiadis, 2013) y Bogotá (Piña, 2014), dado a la reducida cantidad de información disponible solo se utilizan indicadores principales como el consumo material total per cápita. Para complementar esta suplencia se utilizan otros indicadores socioeconómicos. En el estudio de Bruselas se utilizaron los siguientes indicadores:

Tabla 7. Indicadores utilizados en el caso de Bruselas. Fuente: Adaptado de Athanassiadis, 2013.

INDICADORES SOCIOECONÓMICOS	
Densidad	Desempleo
Densidad de oficinas	Salario promedio
Stock Material (absoluto y per cápita)	Tamaño de hogares
Numero de edificios	Crecimiento Demográfico

En el estudio de la ciudad de Bogotá se consideraron como indicadores la densidad poblacional, y el PBI. Un marco de trabajo con indicadores se desarrolla a través de dos categorías: La primera categoría a considerar es el análisis de flujos de entrada y salida para los años seleccionados, y la segunda categoría son las intensidades del consumo de recursos o la generación per cápita. Se procedió a separar cada consumo por sector socioeconómico. Existen 6 estratos siendo E1 el más alto (mayor estándar de vida) y E6 el que posee el peor estándar de vida.

Aquellos estudios con indicadores propios incluyen la ciudad de Londres, Estocolmo, Budapest, Suzhou, Los Ángeles y Limerick. En la ciudad de Londres (Chambers et. al, 2002) se mantiene un indicador común a aquel en el EUROSTAT: El consumo directo de material (DMC), de esta manera, es compatible con otros estudios. Se intentó utilizar el modelo propuesto por Linstead y Elkins (2001). Sin embargo se consideró como limitado, porque se toman en cuenta más flujos en este estudio. Como no fue posible localizar todos los rangos de material y flujos de productos a través de Londres, se priorizó en obtener flujos importantes (como materiales de construcción). En caso de información nacional se hizo una escala o rango para adaptarlo a la ciudad de Londres, utilizando indicadores per cápita, según empleabilidad o PBI.

En la ciudad de Budapest (Pomázi, 2009) también se mantiene el método simple de análisis de conteo en Inputs y Outputs, considerando el indicador DMC. La ciudad de Los Ángeles (Ngo, 2008) utiliza similares indicadores a los de Budapest, la diferencia es que separa los flujos según sector económico (Residencial, Industrial, Comercial, Transporte). Como la cantidad de información disponible es más abundante que en Budapest, existe mayor variedad de flujos de entrada y salida. La ciudad de Limerick, la eficiencia metabólica es el indicador principal y el más característico de este estudio. La ecoeficiencia en un sistema urbano significa la cantidad de servicios sociales por unidad de consumo, sin embargo, se utilizará una variación de esta la cual expresa la relación entre la disposición de un producto y su consumo.

$e = \text{Consumo} / \text{Generación de residuos (Tn/Tn)}$

A partir de la eficiencia metabólica se señalarán los sectores más ineficientes en términos de producción de residuos. Se integrará el consumo y el ciclo de vida de un producto con su impacto en el medio ambiente comparando la generación y el consumo de residuos.

En el estudio de la ciudad de Estocolmo (Burström et. al, 1997) se utiliza un modelo de análisis llamado ComBox, que clasifica a las ciudades como comunidades en las que se generan intercambios de flujos con elementos externos. La comunidad o sociedad está dividida en 12 sectores: Agricultura y Pesca, Servicios, Forestal, Infraestructura, Minería y Extracción, Bienes Raíces, Industria, Transporte, Abastecimiento de Alimentos, Hogares, Energía y Gestión de Residuos. Esta selección de sectores ha sido influenciada por entidades del estado, facilitando

comparaciones entre diferentes municipalidades, y también agregaría la información desde el nivel municipal al provincial e incluso al nacional.

El caso de Suzhou (Liang, 2011) es diferente porque se utiliza el Análisis de Flujo de Materiales como una de las varias herramientas de su modelo DPSIR. Para esta plataforma de estudio se consideran cuatro etapas o procesos: Se calcula la presión, comparando niveles de presión con objetivos impuestos, se puede analizar qué tan aceptable es el método implementado, y si el estado actual no es deseable, se identificaron problemas integrando la presión, el incentivo y el estado. Entonces el modelo se dedicará a identificar problemas. Las respuestas están diseñadas a resolver los problemas. Ante las respuestas se identifican y cuantifican nuevos métodos de desarrollo. Estos pasos se repiten hasta que sea necesario. La presión se calcula mediante el Análisis de Flujo de Materiales, porque el consumo de recursos y emisiones de residuos son los causantes principales de las presiones de una ciudad.

4.5 Cálculos e Incertidumbres

Los cálculos se encargan de utilizar los indicadores existentes, la clasificación de inputs y outputs, y se pueden generar nuevos datos o completar datos incompletos que puedan encontrarse en el sistema. La recolección de información puede ser una tarea exhaustiva, y aun así, no conseguir suficiente para poder realizar un análisis completo. Esto sucede cuando las instituciones encargadas de recolectar datos y estadísticas no consideran la posibilidad de realizar un estudio de metabolismo urbano y por ende la información no es suficiente; o simplemente no poseen la logística y el presupuesto para general tal cantidad de información, esto puede ser así porque es complicado monitorear las actividades de un sector económico al detalle y determinar sus flujos porque la mayoría de actividades se genera en ambientes informales, complicando cualquier intento de recolección de información.

A partir de una metodología específica es posible generar nuevos indicadores que dependen del cambio categórico de los flujos involucrados, estos indicadores generados a criterio del investigador implican cálculos y estimaciones. En el caso de modificación de información, es necesario tener cuidado y evitar el doble conteo, el cual puede afectar los resultados de los indicadores de consumo.

Usualmente, la información es provista en escala nacional, en esta situación lo más viable es ajustar esta información a escala regional/local utilizando indicadores socioeconómicos (PBI, empleabilidad, densidad habitacional, geografía).

Los cálculos dependen de los indicadores, como en el caso de París (Barles, 2009), que adicionó indicadores aparte de los establecidos, y por ende, se añadieron más cálculos al análisis. En el AFM de París se tuvieron que recategorizar ciertos flujos para su adaptación a escala regional: Las exportaciones se categorizaron en residuos exportados y otras exportaciones. Los flujos a la naturaleza y reciclaje fueron categorizados como locales y remotos. Los últimos dos cambios se realizaron debido a que parte de los residuos y flujos generados se trataban fuera de los límites del sistema, cosa que nunca sucede en casos a escala nacional. Se añadió el indicador LEPO, que proviene de los residuos sólidos y líquidos que han sido tratados localmente y exportados. Como el DPO solamente considera residuos locales, es por ello que $LEPO = DPO + \text{Residuos Exportados}$. El tratamiento remoto de residuos tiene un impacto en DMC, porque el total de exportaciones aumenta debido a que los residuos pueden también salir del sistema y ser considerados exportaciones.

$DMC = DMI - \text{Exportaciones}$

$DMC_{corr} = DMI - \text{Exportaciones excepto residuos}$

El análisis a la ciudad de Los Ángeles (Ngo, 2008) presenta las siguientes consideraciones: Inputs y consumo son equivalentes cuando no hay cambio en el stock, para este estudio se ha considerado que los cambios en el stock son mínimos. Los cálculos específicos se realizaron con la recolección de información, y por consiguiente definir los inputs y outputs. El primer cálculo, de balance de flujo de agua está definido por:

$$\text{Precipitación} + \text{Inputs Antropogénicos} = \text{Evapotranspiración} + \text{Descarga} + \text{Aguas Subterráneas} + \text{Desagüe} + \text{Cambio en el Almacenamiento de Agua}$$

Para el segundo cálculo, el balance de energía, se utiliza:

$$\text{Radiación Solar} + \text{Calor Antropogénico de Combustión} = \text{Pérdida de Calor} + \text{Pérdida Sensible de Calor} + \text{Conducción de Calor} + \text{Cambio en la Acumulación de Energía.}$$

El consumo per cápita de alimentos en los EEUU ha aumentado en las últimas décadas. Como el ingreso promedio de EEUU es similar al de L.A., se asumió que el consumo per cápita es similar al nacional.

En el caso de Hamburgo, dada la disponibilidad de la información, el material regional incluirá extracción doméstica inutilizada y flujos indirectos, si la información que concierne a estos flujos (actividades mineras) no está disponible, una primera estimación debe ser obtenida a partir de las principales operadoras mineras del país. Los flujos indirectos asociados a importes serán estimados aplicando valores provistos y calculados por el Instituto Wuppertal y es la información más detallada para flujos indirectos disponible mundialmente.

Este AFM será analizado para un periodo de tiempo entre 1992 y 2001. Se escogió este lapso porque la disponibilidad de información será mejor mientras más reciente sea, además que 10 años son suficientes para capturar cambios recientes en el perfil metabólico.

Para la ciudad de Limerick, la mayoría de información es nacional y se adaptó a escala regional. Esto fue necesario debido a la falta de información para la región y ciudad de Limerick y su dificultad en calcular flujos en escalas menores que las nacionales. El consumo de bienes manufacturados y productos fue estimado por la suma de toda la producción doméstica menos las exportaciones.

La actividad de construcción residencial y comercial se halló utilizando valores nacionales y adaptándolos a la ciudad en los años 1996 y 2002. La mayoría de residuos fueron calculados a partir de estadísticas nacionales generadas en el año 1998, se tuvo que adaptar al año 2002 por el aumento de población.

Para la ciudad de Suzhou (Liang, 2011) se considera el consumo de agua para el cálculo de consumo de recursos. El consumo también se calculó en base a la extracción doméstica, importaciones y exportaciones en el sistema. Todos los datos para el análisis fueron conseguidos directamente. Asimismo, el agua residual no es contabilizada porque las presiones generadas a esta provienen otros flujos, como fertilizantes y pesticidas, que ya han sido contabilizados. Se trató de evitar el doble conteo para los flujos de energía, considerando solo la materia prima y no sus subproductos como en el caso de la energía producida por el carbón. Varios tipos de contaminantes no han sido introducidos al análisis, por falta de información. Por otro lado, el mismo problema ocurre con el cálculo de flujos de biomasa. La información

de flujos en el sector industrial proviene de las mismas compañías que la producen. Ante la falta de información de emisiones de agricultura, construcción, y servicios, se utilizó el sector industrial relacionado a estas actividades.

Para el estudio de la ciudad de Bruselas (Athanassiadis, 2013), el único cálculo es aquel que se utilizó para hallar el stock total, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Stock material total} = \text{peso}(\text{edificios}) + \text{peso}(\text{caminos}) + \text{peso}(\text{carros})$$

Para el peso de los edificios: el 84% son residenciales.

$$\text{Peso (edificios)} = \text{número de edificios} * \text{número promedio de pisos} * \text{área de departamentos} * \text{peso por m}^2.$$

En el estudio de la ciudad de Londres solo se recomienda tener cuidado con el conteo doble, que implica contar todos los estados en el que el producto ha sido procesado además del producto final, siendo el elemento el mismo.

Las áreas potenciales de este conteo son: 1) En los sets de información, en donde afecta el análisis de flujo de materiales, y 2) Los impactos entre componentes.

En las ciudades de Estocolmo (Burström et. al, 1997), Budapest (Pomázi, 2009) y Bogotá (Piña, 2014) no se hacen cálculos adicionales, solo utilizan el modelo simple de AFM.

4.6 Observaciones y Conclusiones

Esta es la parte más extensa y una de las más importantes en un estudio de Metabolismo Urbano. Consiste en el análisis de todo el estudio, la interpretación y las conclusiones respectivas. Esta disciplina tiene como propósito final obtener la sostenibilidad de las ciudades, si bien no es necesario, es importante determinar la aplicación de este artículo o estudio en las instituciones que se encargan de aplicar políticas y generar cambios en el sistema.

Los indicadores establecidos en la metodología son revisados y se indica su utilidad en el estudio, se compara con indicadores de estudios realizados en el mismo país o en otras ciudades foráneas. De la misma manera, puede identificar características del estilo de vida y de las actividades económicas principales de una ciudad a través

de sus flujos. Por otro lado, también se considera establecer relaciones entre indicadores, como en el caso de consumo total de biomasa para las ciudades turísticas. Si bien el consumo per/cápita es significativo, no significa que el residente consume tal cantidad, sino que existe una cantidad considerable de gente que se encuentra en la ciudad por un plazo corto para luego retirarse.

Una manera recomendable de llegar a conclusiones respecto al metabolismo de la ciudad es el análisis de resultados por sector económico. Conocer los índices de consumo, producción y generación de residuos del sector industrial, comercial, transporte y doméstico, permite llegar a una comprensión completa del funcionamiento de la ciudad, la relación entre la sociedad y su infraestructura y como afecta ésta la naturaleza urbana.

Otros indicadores relevantes que requieren el análisis son los índices de reciclaje y tratamiento de residuos, el objetivo de las ciudades son lograr el menor impacto ecológico y ambiental, mientras más residuos sean reciclados, se reutilicen para generar energía, se generen menos emisiones al aire utilizando infraestructura eco amigable, se podrán lograr los objetivos generales de un estudio de Metabolismo Urbano.

Al relatar las conclusiones resalta aquellas encontradas en la ciudad de París (Barles, 2009), puesto que no solo determina los resultados, sino que los compara con estudios similares de otras ciudades e intenta determinar las causas posibles a estos resultados, involucradas directamente al comportamiento de la infraestructura en la ciudad. En este estudio, se analizó el impacto de aplicar AFM al nivel local con DMC (Eurostat). Los valores para París (2.2 t/cap), PPC (3.0 t/cap), son muy bajos y claramente son el resultado de la exportación de residuos en estas áreas, en cambio IdF (7.1 t/cap.) presenta valores normales porque todos los residuos son tratados dentro de esta región. Con el DMCcorr los valores para París y PPC son 5.0 t/cap y 4.6 t/cap. El valor para Francia es 13.2 t/cap. Asimismo, el DMI de París y IdF es 8.8 t/cap y 12.3 t/cap, siendo el valor para Francia 16.5 t/cap. Ambos valores son bajos porque esta región es la que menos extrae, produce y transforma que el resto de la ciudad. En este caso, importa la mayoría de sus bienes. La elaboración de estos bienes requiere más consumo de materiales que el bien mismo.

También se examinaron los flujos totales a la naturaleza representados por LEPO. Los valores de París (5.1 t/cap), PPC (5.9 t/cap), e IdF (6.8 t/cap) indican que mayoría

de los Inputs de la región regresan a la naturaleza (57%, 53% y 55% para París, PPC y IdF respectivamente). Esto excede las exportaciones comerciales. También, los niveles de reciclaje son mucho menores (10% del DMI en París, 7% en PPC, 5% en IdF). Los resultados para NAS son bajos, esto puede ser porque Ile de France puede estar saturada con materiales, y la renovación de edificios es escasa. Sin embargo, como esta viene de una ecuación y no de valores exactos, se vuelve susceptible a errores de fuente (por BO y BI) y pueden limitar su precisión. El centro de la ciudad (París) depende casi en su totalidad de otras áreas para sus Inputs y flujos a la naturaleza, esta dependencia se reduce en la zona urbana densa (PPC), porque el tratamiento de residuos sólidos se encuentra en la Petite Couronne.

El origen de los alimentos y productos agrícolas, junto con la diferencia entre DMI y DMC representa: a escala regional el DMI es 2.2 t/cap, de la cual la extracción local es solo 0.5 t/cap, mientras el DMC es 0.9 t/cap y las exportaciones son 1.3t/cap, a pesar de altos niveles de producción, la agricultura regional no está solamente restringida a abastecer localmente. El consumo de productos manufacturados es mayor en París que en PC y esta es mayor que GC, esto se debe a los estándares de vida en estas áreas y refleja la importancia del sector servicio en París. El consumo de combustibles fósiles es mayor en GC que en PC y París, por la dispersión urbana que tiene esta primera (suburbios). La región está alejada de ser autosuficiente con los materiales de construcción, la extracción local es 1.5 t/cap, y el consumo regional es 2.6 t/cap y los rellenos de desmonte son 1.5t/cap. Esto indica que es necesario controlar la extensión urbana, reducir la demanda para materiales de construcción y reciclar residuos de demolición para reducir su extracción.

La ciudad de Hamburgo (Hammer, 2003) también logra determinar ciertos comportamientos y características de su infraestructura y sociedad. El DMI aumento de 98 millones de toneladas en 1992 a 117 millones de toneladas en el año 2002. La extracción doméstica solo es aprox. 160000 toneladas por millón de DMI, esto significa que DMI es en su mayoría importes. El DMI per cápita aumento de 75.8 toneladas en 1992 a 68.3 el 2003. El DMC es significativamente menor que el DMI con 10.9 toneladas per cápita en 1992 y 18.9 toneladas el 2002. El DMI per cápita de Hamburgo es mucho mayor que el promedio alemán (20 t/cap al año), sin embargo el DMC es menor que el promedio. La importancia de los importes no es sorprendente en esta región, al no tener muchas actividades extractivas (minería, agricultura).

La diferencia de DMI y DMC en Hamburgo se puede explicar por el efecto "puerto". En efecto, es uno de los grandes puertos de Europa y recibe grandes cantidades de material y productos que son re-exportados de nuevo. El DMI y el PBI permanecieron constantes (alrededor de 1.6 toneladas por millón de euros), el DMC incremento de 300 a 460 toneladas por millón de euros. No muestra tendencias de desmaterialización. Es diferente a la situación de Alemania, en donde la productividad de los recursos aumenta y el PBI puede ser producido con una menor cantidad de materiales. Las importaciones aumentaron un 20% en estos 10 años, la categoría más importantes es minerales industriales y productos industriales, biomasa y combustibles fósiles. Las exportaciones son el 20% de los importes mostrando la importancia del puerto de Hamburgo como centro de intercambio internacional. Los grandes grupos de exportación son minerales y productos químicos.

La ciudad de Los Ángeles (Ngo, 2008) tiene como objetivo ser un ejemplo para otras ciudades del país, por ello necesita establecer ciertos objetivos respecto a sus resultados. El consumo de alimentos aumentó un 13%, entre los años 1990 y 2000, y significa que este aumento es mayor que el crecimiento poblacional. La producción local de alimentos aumento, aunque su contribución no fue significativa al consumo total de la población. La precipitación total en el condado suman aprox. 2000 millones de m³ de agua (1990) y 3000 millones de m³ (2000), el consumo de agua per cápita se redujo un 6% durante el periodo de estudio. El uso de agua residencial aumentó, pero el uso para regadíos se redujo, junto con la reducción de granjas y uso de ganado. El consumo total per cápita fue de 258 m³ por año el 2000.

El consumo total de energía entre los años 1990 -2000 permaneció casi constante, solo aumentando un 7%, una tendencia que ocurrió en todo el estado de California. Asimismo, la disposición de residuos sólidos se redujo un 7% en el periodo 1990 - 1999, de todos los residuos generados el 44% proviene del sector residencial. La generación per cápita total es de 0.9 MT. En el año 1989, el estado de California pasó la ley de Gestión de Residuos, que indicaba que las ciudades deben desarrollar estrategias para desviar el 25% de residuos sólidos a rellenos sanitarios en el año 1995 y el 50% el año 2000. La ciudad de Los Ángeles excedió ese nivel con un 59% de desvío en el año 2000. Cada residente de la ciudad produce 0.38 m³ de desagüe al día, 139 toneladas per cápita.

Las emisiones de gases de efecto invernadero totales son de 117 MMT de CO₂ en 1990, con un incremento de 6% en el año 2000, proporcional al crecimiento demográfico. El sector que más aportó con las emisiones es el de transporte, consistió en el 44% del total. Asimismo, el consumo de alimentos constituye en 41% de los residuos sólidos en la ciudad de Los Ángeles. La cantidad de residuos sólidos se redujo debido a un programa de reciclaje a gran escala en la región. Por lo tanto, el condado de Los Ángeles ha progresado en establecer metas de sostenibilidad reduciendo los inputs per cápita de agua y energía y outputs de residuos sólidos. El consumo total per cápita de energía, provenientes del sector transporte y el consumo de agua, es alta respecto a otras ciudades.

En el caso de la ciudad de Limerick, se señala principalmente los cambios en el consumo y la eficiencia metabólica. El consumo total de productos y materiales de construcción aumentó un 64% entre los años 1996 y 2002. Los cambios más importantes generados provienen de materiales como madera y materiales de construcción. Por ello, es probable que el mayor impacto en consumo son los materiales de construcción porque representan el 76% del aumento de consumo total. El aumento más significativo de ineficiencia metabólica pertenece a aquellos productos metálicos manufacturados para uso doméstico (+137%). Esto es posible por el reducido tiempo de vida que posee a comparación de otros productos. Los sectores con menor ineficiencia son aquellos productos que poseen mayor tiempo de vida. Significa que el ciclo de vida de un producto tiene relación con su eficiencia metabólica en el tiempo. La reducción de consumo de materiales de madera, de construcción y químicos/plásticos implica que hay una eficiencia en la recuperación y reciclaje de sus respectivos residuos.

Sin embargo la ineficiencia metabólica total se redujo un 31% entre el año 1996 y 2002. Esto se podría explicar por la diferencia entre el aumento de consumo total doméstico (64%) y el aumento de generación de residuos (18%), que significa que el sistema es más eficiente. Probablemente la relación entre la eficiencia metabólica y la generación de residuos/reciclaje no sea directa. En efecto, para reducir la generación de residuos se necesita intervenir en los inputs o en otras etapas del ciclo de vida. Para reducir la eficiencia metabólica es importante diseñar productos durables. La diferencia de información utilizada en otros estudios complica la comparación y análisis, se sugiere realizar una estandarización de colección de información. Asimismo, la metodología de este estudio puede mejorar si se diferencia entre metabolismo industrial, social y doméstico (escalas de estudio).

Finalmente, se resalta que el objetivo de la producción industrial es asegurar que los materiales y energía utilizados sean de larga duración, que facilitan la recuperación y reciclaje, en vez de invertir en elementos que serán obsoletos al corto tiempo. Aunque las ineficiencias metabólicas sean reducidas, si no se reduce el consumo de materiales, el reciclaje y el reusó solo mitigarán parcialmente el problema.

El estudio de la ciudad de Suzhou (Liang, 2011) describe comportamientos actuales y futuros. La energía y demandas minerales dependen de importaciones, pues los depósitos locales son casi inexistentes. El 70% del consumo de energía proviene del carbón y permanecerá así por un periodo significativo de tiempo. Asimismo, el sistema urbano de Suzhou consumió 341 498 000 toneladas métricas de recursos (excluyendo el agua) en el año 2005, 7 billones de toneladas métricas de agua, y 114 602 000 toneladas métricas de CO₂. Cabe resaltar que los sectores construcción, industria y agricultura dominaron el consumo de recursos y emisión de residuos. La mayoría de residuos provienen de industrias metaleras, textiles, productos químicos, productos minerales, energía eléctrica, producción de calor y productos de papel.

Si se continua con estas tendencias, y no existe un cambio de políticas urbanas, el metabolismo se desarrollara en un modo lineal, la eficiencia no se podrá reducir y el consumo aumentará 3.1 veces más que en el año 2005. Parte de los problemas provienen de las industrias y manufacturas, que van en aumento y cuyos procesos requieren el consumo masivo; y el turismo creciente, el cual demanda un consumo mayor per cápita. La cantidad de agua disponible (3 billones de toneladas métricas) es mucho menor a la demanda total, existe escasez de agua subterránea, y el agua es de mala calidad. Cabe señalar que el desarrollo general en China se dirige a la industrialización, pero propone transformar las industrias manufactureras y promover servicios como software y turismo; mejorar las tecnologías actuales, eliminando empresas pequeñas y utilizando materiales eco-amigables. La mejora en la eficiencia del reciclaje de residuos y materiales depende del esfuerzo de las industrias.

Aplicando políticas efectivas, se proyectaron ciertas tendencias para el año 2015: El consumo de recursos, agua y residuos serian 14% menor, 4.5% mayor y 28.9% mayor que los niveles del 2005. Las demandas de energía crecerán un 49% hasta el 2015, esto es por el aumento de industrias electrónicas, manufactura y servicios, además del parque automotor, por consiguiente, la emisión de carbono en el aire aumentará a 71%. El consumo de biomasa se reducirá en el 66.5% por el bajo crecimiento de sectores que consumen biomasa. La desmaterialización de

materiales debería enfocarse en la agricultura, industria y construcción, mientras que la desmaterialización de residuos se debe enfocar en los servicios y el consumo doméstico. Estudios futuros en metabolismo urbano deberían prestar más atención a mejoras estadísticas y soluciones deseables para recrear interacciones entre sectores en sistemas económicos.

El estudio de la ciudad de Budapest (Pomázi, 2009) posee un análisis en un cierto periodo de tiempo, y por ello, existen cambios en estos periodos. En 1965, el consumo per cápita, junto con consumo de agua, es de 114.5 toneladas. Si no se considera el consumo de agua el valor se reduce a 0.88 toneladas. Para el 2005, este indicador fue 88 y 1.8 t/cap. El consumo de agua total fue de 210 millones de toneladas mientras en 1986 estos valores llegaron a los 327 millones. En el año 2005, el consumo fue de 160 millones de toneladas que consistían en el 25% del nivel de 1960.

Se pueden distinguir tres periodos en el total de uso de recursos en Budapest. El primer periodo duro desde el año 1955 hasta 1980, un periodo que se considera como desarrollo extensivo de la metrópolis. En el siguiente periodo, entre 1980 y 1990 puede considerarse como una pre-transición caracterizada por un estancamiento el uso de recursos. El tercer periodo que comenzó en 1990 se caracteriza por la eficiencia de recursos, esto puede ser explicado por una caída de densidad poblacional, transformación de patrones de consumo de la ciudad, y un uso más consecuente del principio del "usuario paga". Se observa un desfase de 5 años en la eficiencia de recursos entre los inputs y los outputs. En ambos casos se puede observar los tres periodos definidos.

En la ciudad de Bruselas (Athanassiadis, 2013) se señalan características generales de consumo y su relación con indicadores socioeconómicos. El consumo de energía es de 24,306 GWh del cual 42% es gas natural, 24% es electricidad, 12% son derivados de petróleo. El consumo final de energía es dividida como tal: residencial (42%), terciaria (33%), transporte (22%), y la industria (3%). Esto genera GHG de hasta 3.5 t/cap, además, como esta energía se produce fuera de los límites de la región, significa que hay una mayor emisión total de GHG. La ciudad de Bruselas requiere anualmente 60 t/cap (163 kg/día), aunque la mayoría de estos requerimientos provienen del consumo de agua (48 t/cap). De todos los productos importados 31% fueron minerales u materiales de construcción, 3% fueron fertilizantes y productos químicos, y 39% son bienes manufacturados.

Los residuos que salen del sistema consisten en 4 categorías: Residuo doméstico (23%), excavaciones (25%), residuo constructivo y de demolición (31%), y por último residuo de actividades industriales (21%). El stock total de la ciudad de Bruselas es de 117 394 kton (aprox. 100 ton por persona), este stock está compuesto por 97% de minerales, 76% de edificios, 23% de caminos y 1 % de vehículos. Asimismo, en el análisis de las relaciones entre el consumo y factores locales, se encontraron ciertas correlaciones entre el consumo y número de automóviles, también se encontraron relaciones entre el agua y el coeficiente GINI de desigualdad socioeconómica. En general, existe una relación entre el consumo/área construida y el sueldo promedio, desempleo, crecimiento demográfico y densidad.

En Bogotá (Piña, 2014), los materiales de construcción incluyen arena, piedra, arcillas, etc., los cuales son explotados ilegalmente. Eso contribuye al 86% de los problemas relacionados al medio ambiente, incluyendo daños geomorfológicos. Asimismo, el consumo de energía y gas natural ha aumentado un 22% y 26% respectivamente. Las emisiones de partículas se han reducido debido al refinamiento de combustibles y aplicación legal de requerimientos que impactaron al sector transporte. Además, es necesario continuar mejorando el procesamiento, uso y sustitución de combustibles para lograr el desarrollo sostenible en los hogares y el sector transporte.

Las tendencias en consumo de alimentos han sido mantenidas en la última década, y la disposición de rellenos sanitarios ha aumentado en un 30%. La cantidad de edificios y residencias ha aumentado significativamente, el promedio de metros cuadrados aumentó de 403 771 en 2000 a 1 332 847 para el 2010. Este aumento ha llevado al crecimiento del sector construcción y por ende, aumenta la demolición y eliminación de residuos (escombros). Por otra parte, una alternativa de análisis de los flujos de materia es a través del indicador per cápita. El consumo de energía y alimentos ha aumentado en las últimas tres décadas, mientras que el consumo de agua se ha reducido, gracias a las campañas para mejorar el uso del agua. Emisiones y aguas servidas se han reducido, mientras que la producción de residuos sólidos ha aumentado.

Las fuentes de energía han cambiado entre el año 1980 (Gasolina, Carbón) y el año 2010 (Gasolina y Gas natural). El uso de electricidad y combustibles fósiles aumento 1172.04 TJ/año y 326,47 TJ/año. El 2010 se consumió 193.8 MJ de energía, el 20.7%

de consumo de energía en Colombia. El consumo de agua se redujo de 178 L en 1980 a 111 L en el 2010. Esto se produce por cambios en la tarifa de consumo, además de incentivar la importancia del cuidado del agua. El 2010, se produjo 233.5 millones m³ de aguas servidas, el 60% se destinó a la planta El Salitre. El 2010, se generó 2 886 055 toneladas de residuos sólidos provenientes de hogares. La cantidad de reciclaje per cápita es muy baja, siendo menos de 1 t/cap. Los residuos de materiales de construcción generaron 1 millón de m³ en 1995, 3 millones en el 2002, 6 millones el 2006, 12 millones el 2010.

En la ciudad de Estocolmo (Burström et. al, 1997), como no se generan valores específicos en el Análisis, se señalan conclusiones generales e indicaciones básicas del comportamiento de las ciudades. Diferentes estudios de flujos materiales en Estocolmo han revelado mucha información de importancia para la gestión ambiental en la ciudad:

Para muchas sustancias, el subsistema sociedad de Estocolmo funciona como un disipador, significa que grandes cantidades de alguna sustancia analizada en cuestión se disipa en el sistema. Las fuentes difusas son muy importantes como fuentes para emisiones al ambiente. Estilos de vida personales y hogares privados son importantes como el origen y fuente de estas emisiones y presiones ambientales de nitrógeno y fósforo. Diferentes estructuras en Estocolmo (edificios, vías vehiculares) son importantes como fuentes para emisiones y presiones ambientales de metales y PCB. Las actividades de la sociedad identificadas como los orígenes más importantes a una presión ambiental no son controladas por la presente legislación o no son supervisadas por la administración ambiental.

Un problema importante en estos análisis es la falta de información relevante. Es necesario realizar cambios importantes en la colección, almacenamiento y procesamiento de información ambiental en la ciudad de Estocolmo para elaborar análisis de este tipo.

En el estudio de Londres (Chambers et. al, 2002), al estar asociado con el estudio de Huella Ecológica, las conclusiones se vuelven simples, porque solamente determinan cantidades específicas de consumo. En el año 2000, Londres consumió 154 000 GWh de energía. Las emisiones asociadas con este consumo fueron 40 972 000 toneladas. La categoría de consumo más utilizada es el Gas (17 266 000 toneladas de CO₂). La electricidad produjo el segundo nivel más alto de emisiones de CO₂.

Se consumió alrededor de 49 millones de toneladas de materiales y alimentos. El 81% de estos alimentos fue importado desde fuera el país. Asimismo, el sector construcción es el que consumió más materiales, que también produjo la mayoría de residuos (14 756 000 ton). Además, esto contribuye al stock de la ciudad (13 024 000 ton).

Londres generó más de 26 millones de toneladas de residuos, de las cuales 14.8 millones fueron generados por el sector construcción, 7.9 millones fueron generados por el sector industrial y comercial y 3.4 millones generados por hogares. Esta ciudad tiene el consumo de materiales per cápita (DMC) más elevado, con 6.7 toneladas per cápita por año. Esto es más que el promedio del RU, 6.1 t/cap. Se considera que puede haber errores metodológicos, como el doble conteo.

CAPITULO V: LIMA METROPOLITANA COMO CASO DE ESTUDIO

5.1 Contexto socioeconómico – Antecedentes

La ciudad de Lima, la capital del Perú, es la ciudad más importante del país, y una de las más importantes de Sudamérica. Tiene una población de más de 9.7 millones de personas (INEI, 2015). A partir de mediados del S. XX, el crecimiento demográfico creció exponencialmente las tasas de crecimiento a 5.7% entre los años 60, a causa de la inmigración desde el resto de departamentos en el país, ya sea por motivos económicos o conflictos internos (IMP, 2014a). La tasa de crecimiento demográfico actual es de 2.0%, Lima es aún una ciudad joven, su edad promedio es de 30,1 años, pero ha encontrado estabilidad demográfica.

La ciudad concentra la mayor cantidad de demanda de materiales y energía en el país. Asimismo, el país posee una estructura socioeconómica centralizada en la capital, abarca la mayoría de actividades administrativas y gubernamentales (IMP, 2014a). Por tener el puerto más importante del país, Callao, gran cantidad de productos que son importados logran entrar al país a partir de esta ciudad (MTC, 2011). Además, posee el aeropuerto internacional más importante del país, y por ende la mayoría de visitantes extranjeros llegan a Lima (MTC, 2011).

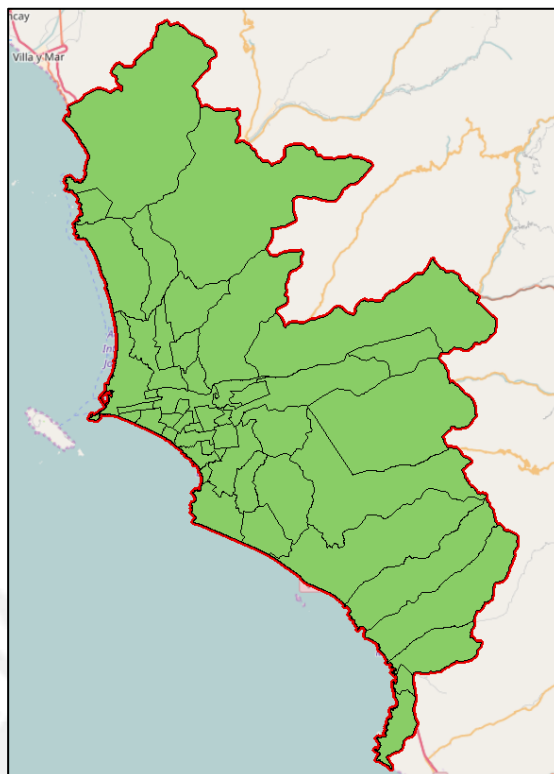


Figura 14. Lima Metropolitana y sus distritos. Fuente: Elaboración Propia.

El propósito de realizar un Análisis de Flujo de Materiales es porque no existen precedentes de este, y sin embargo es importante y necesario determinar el consumo y producción de materiales y energía, generación de residuos y emisiones al aire. El objetivo final es lograr que Lima se convierta en una ciudad cuyo desarrollo sea sostenible y el primer paso es identificar cuales sus carencias y a partir de qué estado se debe comenzar a planificar y establecer políticas de consumo.

5.2 Sistema

Ubicada en la costa central del Océano Pacífico, la Región Metropolitana de Lima, que incluye la provincia de Lima y la provincia constitucional del Callao es la región urbana que abarca desde el distrito de Ancón en el norte y el distrito de Pucusana en el Sur. Posee 42 distritos, entre los cuales el más grande es Carabayllo (346.88 km²) y el más poblado es San Juan de Lurigancho (898 443 habitantes, IMP 2015). En cuanto a actividades económicas y roles de centros urbanos, Lima se divide en cuatro Centros: Lima Norte, Lima Sur, Lima Este, en estas tres áreas las funciones son comerciales, productivas; y Lima Centro cuyas funciones son comercial, administrativo, financiero y de servicios (IMP 2013).

5.3 Inputs – Outputs

Los inputs y outputs se clasificaron acorde al procedimiento 3.8 del capítulo tres. Básicamente todos los elementos que ingresan al sistema son considerados como inputs, cabe agregar que Lima es el foco urbano más grande del país, además que posee el puerto y aeropuerto más importante, por ende la cantidad de materiales que ingresan serán mayores que en otras ciudades del país. Todos los elementos que salen del sistema son considerados como outputs, la ciudad abastece de cierta manera al resto de ciudades del país, y por ello se también debe considerar la cantidad de materiales no utilizados que salen del sistema.

Los flujos que entran al sistema, según la información disponible, se clasifican en: agua, energía eléctrica, combustibles fósiles, materiales y biomasa.

El agua potable proviene de las cuencas del Rímac y Chillón. Estas se derivan a la Planta de Tratamiento La Atarjea (78%, 18.00 m³/s) y Chillón (4%, 2.00 m³/s), y el resto a los Pozos Sedapal y Agua Azul (15% y 3%) del agua potable proviene de los pozos de Lima y Callao (SEDAPAL, 2015). El consumo total de agua en el año 2014 es de 530 891 miles de m³ (INEI, 2015). Sin embargo, la producción total de agua potable es de 687 580 miles de m³. La diferencia puede explicarse por fugas en la red de distribución, medidores y venta informal de agua potable en la periferia de la ciudad (SEDAPAL, 2015).

Respecto a la biomasa, existen terrenos agrícolas en Lima Norte (69.2%), Lima Este (20.4%) y Lima Sur (10.3%) de la superficie total, lo que significa que hay cantidad de productos agrícolas que ingresan al sistema (IMP, 2013). Según el censo nacional agrícola, en el año 2013 se produjeron 35.20 toneladas de productos agrícolas, entre camote, cebolla y maíz amarillo (MINAG, 2015).

A partir de un estudio de consumo per-cápita de alimentos (INEI, 2010) se puede calcular el total de biomasa consumida en Lima Metropolitana. Asumiendo que el consumo total de alimentos per-cápita de alimentos es constante en todos los años. El consumo es de 4 364.8 miles de toneladas anuales. Los alimentos consumidos comprenden desde harinas, arroz, fideos, carnes y pescados, lácteos, huevos, frutas, azúcar, tubérculos y bebidas (INEI, 2010). Para Lima Metropolitana el consumo total es de 12 109 GW.h de energía eléctrica en el año 2014 (MEM, 2015; COES, 2015), las centrales hidroeléctricas de Matucana (910.7 GW.h), Moyopampa (556.5 GW.h),

Callahuanca (605.8 GW.h), Huampaní (214.4 GW.h) y Huinco (1 318.7 GW.h) son las que abastecen la ciudad (IMP, 2014e). En cuanto a centrales termoeléctricas, las plantas de Santa Rosa (904.1 GW.h), Ventanilla (3 352.6 GW.h), Kallpa (5801.2), Fénix (1 512.8 GW.h) y Las Flores (122.5 GW.h).

La Cooperación Peruano-Japonesa (JICA) realizó un estudio sobre el transporte urbano en la ciudad de Lima. El transporte de carga se encuentra como uno de sus objetos de estudio y permitieron hallar datos importantes sobre los flujos de materiales (productos). La composición del transporte de carga se divide en tres entradas terrestres a la ciudad: Lima Norte, Lima Este y Lima Sur. La cantidad total de toneladas entrantes a la ciudad son aproximadamente 16.3 mega toneladas. Esto incluye productos ganaderos/pesqueros, productos alimenticios, madereros e industriales.

Para poder completar el flujo de entrada de productos en la ciudad de Lima, también se debe contabilizar la carga que llega del aeropuerto Jorge Chávez y el puerto de Callao. Por ello, el aeropuerto descargó un total de 108 614 toneladas de carga entre nacional e internacional en el año 2014 (MTC, 2015). Asimismo, el puerto de Callao descargó un total de 17 630 miles de toneladas en el año 2014.

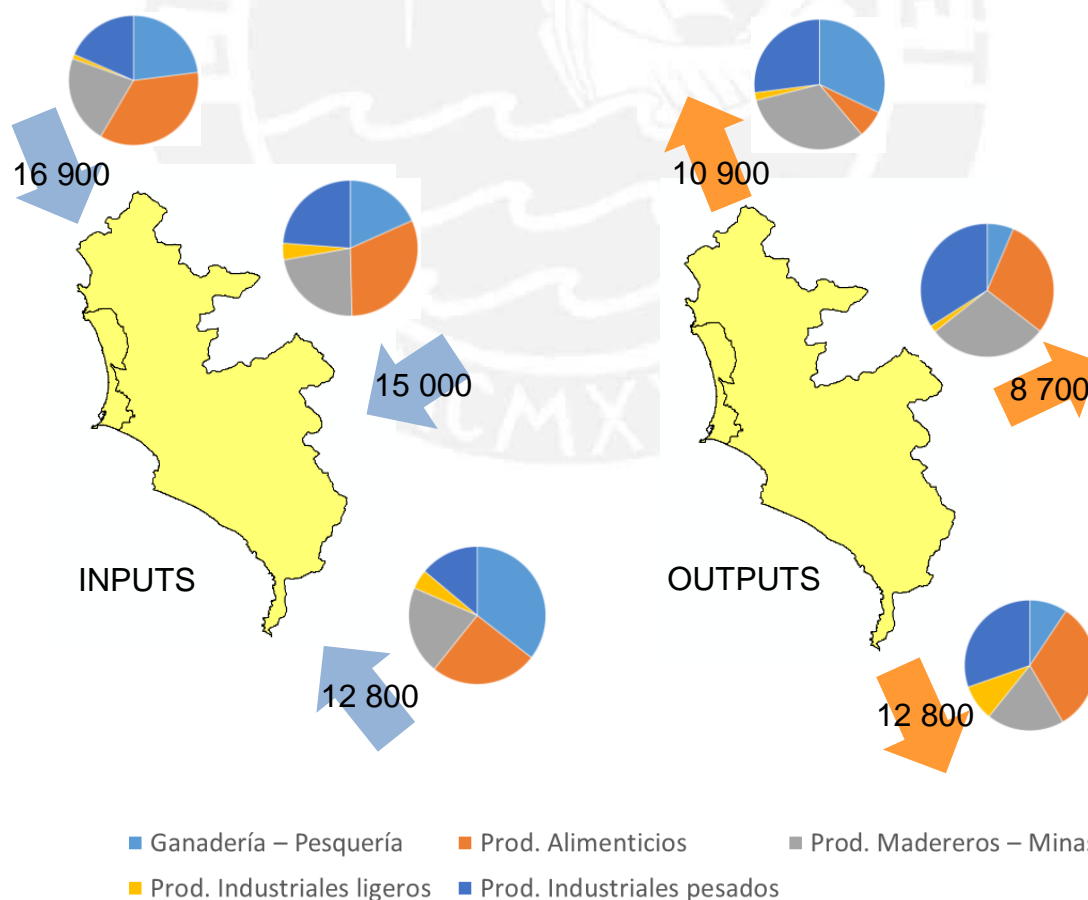


Figura 15. Cantidad y distribución del flujo de transporte de carga a través de las principales vías terrestres en Lima. Unidades en ton/día. Fuente: Adaptado de JICA (2007).

Para poder detallar estos flujos de entrada consideraremos aquellos cuya información se encuentra disponible. Materiales de construcción como el cemento se producen dentro de los límites de Lima Metropolitana: 3 950 miles de toneladas producidas y 366 miles de toneladas que entran al sistema anualmente. El acero es otro material que se produce en otros departamentos (539 miles de toneladas anuales).

Respecto a los outputs o flujos de salida, se consideran los residuos sólidos, desagüe, productos exportados internacionalmente o fuera del sistema, y emisiones al aire.

Todos aquellos materiales que salen del sistema como productos a exportar se consideran en parte del análisis. En efecto, la carga nacional e internacional del Aeropuerto Jorge Chávez es de 225 153 toneladas (MTC, 2015). El total de carga exportada desde el puerto del Callao es 9 907 miles de toneladas métricas.

En la ciudad de Lima existen estudios que determinan la cantidad de contaminantes en el aire, la emisión total de 163 893 Ton/año. De ellas, las partículas totales en suspensión (PTS) corresponden a 86 652 Ton/año, asimismo, 8 460 Ton/año corresponden a partículas menores a 10 micras (PM-10) (10% aprox), 40 821 Ton/año provienen de emisiones de dióxido de azufre (SO₂, 50%), el resto lo componen el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), (DIGESA, 2005).

Los residuos sólidos generados en Lima Metropolitana están compuestas principalmente de materia orgánica (50.78%), papel (7.08%), tecnopor y similares (8.92%), metal (5.07%), plástico PET (4.04%), (IMP,2014e). Asimismo, las zonas que generan más residuos son las zonas Centro y Este. La disposición final de la mayoría de residuos es de relleno sanitario (92.6%). El total de generación de residuos anual es de 3 067.75 miles de toneladas (INEI, 2014).

El servicio de alcantarillado administrado por SEDAPAL recolecta 18 m³/s (SEDAPAL, 2015). Asimismo, existen 22 PTAR (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales) en Lima Metropolitana. De estas, solo tres realizan tratamientos primarios, dieciocho realizan tratamientos secundarios y uno realiza tratamiento terciario. La reciente construcción de los PTAR (Plantas de Tratamiento de Aguas

Residuales) de La Taboada y La Chira, permiten tratar hasta 20 m³/s de desagüe, cubriendo totalmente su capacidad. (IMP, 2013). La cantidad total anual de agua residual generado en el año 2014 es de 409 289 miles de m³.

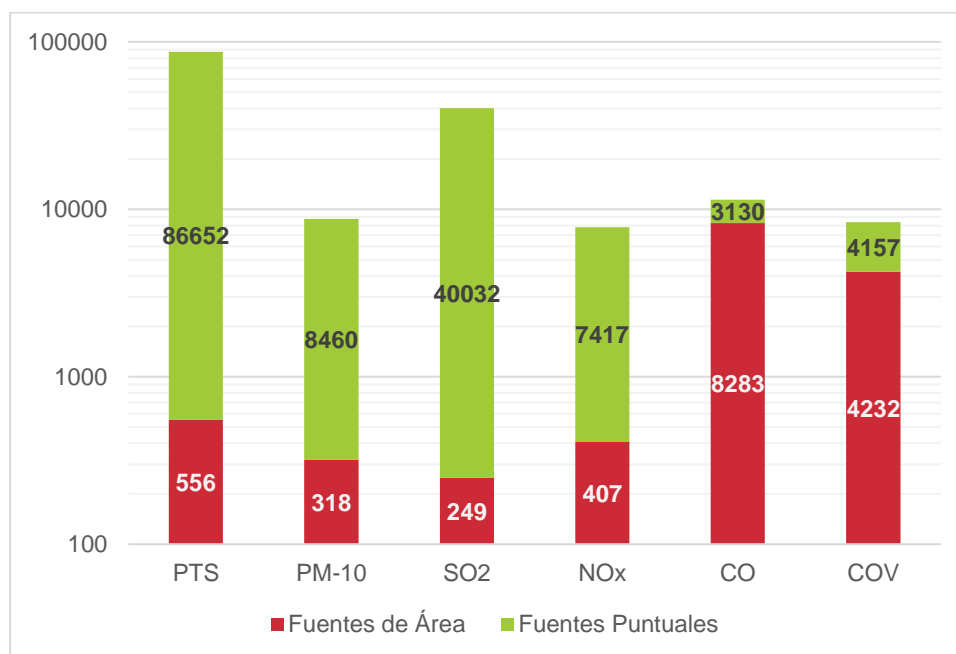


Figura 16. Emisiones anuales al aire. Fuente: Adaptado de DIGESA, 2005.

Finalmente, se realiza un estimado de todos los flujos antes mencionados. El año de estudio es el 2014. La resta entre los inputs y outputs no es el stock dado que todos los flujos no han sido contabilizados. Asimismo, valores actuales del acumulado no están disponibles (edificios, infraestructura y productos).

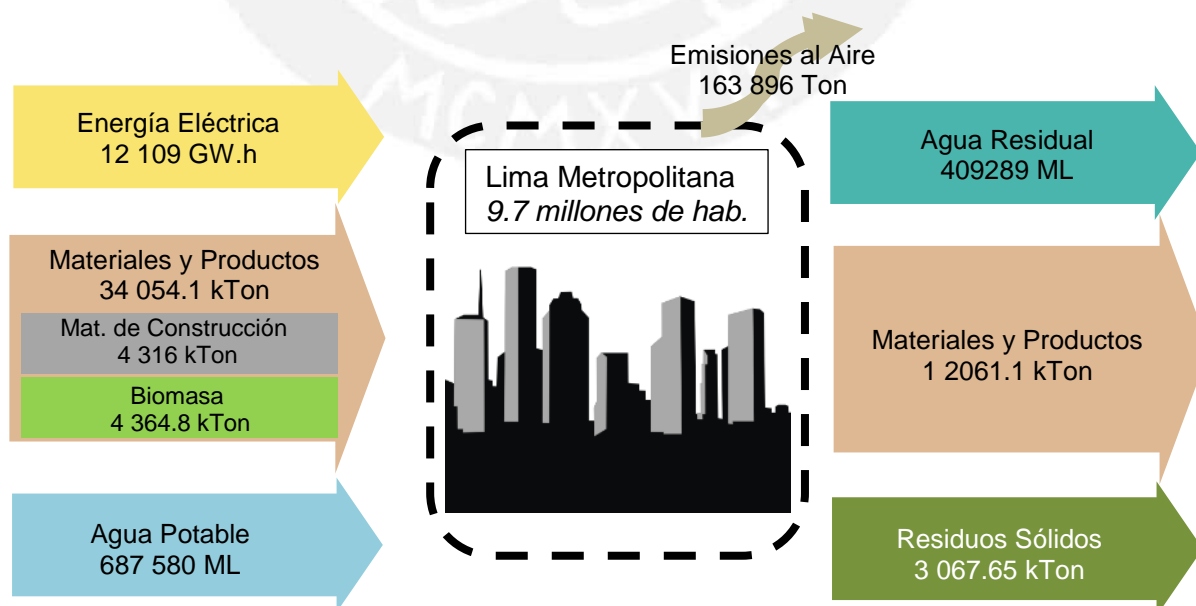


Figura 17. Análisis metabólico de la ciudad de Lima. Elaboración Propia.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

Todas las actividades humanas generan consecuencias. Desde los comienzos de nuestra historia hemos utilizado los recursos naturales disponibles, directamente, y posteriormente para generar otros productos. Como la totalidad de recursos disponibles satisfacían plenamente a la población total, se daba por sentado que estos eran infinitos. Cabe señalar que la explosión demográfica que empezó en el S. XX y continua hasta nuestros días, nos permitió comprender que el planeta Tierra posee una capacidad de carga disponible para la población mundial y que es probable que estemos a punto de alcanzarla. Además, las actividades que se realizan generan impactos a la naturaleza, acelerando el proceso de degradación.

Si observamos cómo se desarrolla la sociedad, la tendencia actual de la población es el aumento de zonas urbanas, el crecimiento de ciudades y la aparición de megaciudades, aquellas que tienen más de 10 millones de habitantes. Esto significa que la mayoría de recursos y energía se concentraran en las ciudades, y la clave para la sostenibilidad se encuentra en cómo estas se manejan. La disciplina encargada del desarrollo sostenible de las ciudades es el Metabolismo Urbano.

Durante mucho tiempo, la ciencia se ha dedicado a extender sus conceptos y especializarse. Es probable que, como consecuencia de la infinita curiosidad del ser humano, las disciplinas científicas se separaron entre si y formaron sus propios métodos, lingüística y propias percepciones del mundo. Esto también significa que la comunicación entre disciplinas ha sido, y aún es, escasa. Sin embargo, el Metabolismo Urbano, como varias de sus disciplinas hermanas como la Ecología Industrial, Política Urbana y Economía Ecológica, tiene como esencia la conexión entre otros conocimientos y percepciones sobre los fenómenos que nos rodean. Por ello, en vez de enfatizar y profundizar en una línea de conceptos, el Metabolismo Urbano se ha nutrido de diversas materias y disciplinas científicas como la Biología, Ecología, Sociología, Economía, etc.

No es sino hasta mediados del S. XX que el Metabolismo Urbano se refiere como propio y se convierte en objeto de estudio, con la publicación de Abel Wolman, El Metabolismo de las Ciudades (1965), y una serie de publicaciones posteriores, con enfoques al análisis de flujos de energía o materiales, fortalecieron el crecimiento de la disciplina, sin embargo, no existía una metodología determinada y eso no permitía la comprensión y comparación total de resultados. En las últimas dos décadas, la

cantidad de publicaciones referentes ha crecido exponencialmente y cada vez más las instituciones gubernamentales y académicas están mostrando interés por el desarrollo de la disciplina.

El análisis de las ciudades nos permite llegar a ciertas conclusiones. Se puede decir que a pesar que existan diferencias metodológicas, existe un concepto base de lo que representa el AFM, y se pueden extraer resultados comparables entre sí, por ejemplo, el DMC (consumo directo de materiales) que permite comparar en su totalidad la cantidad de materiales consumidos, entre biomasa, combustibles fósiles y materiales no perecibles. Este indicador está presente en casi todos los estudios y aunque aún no sea completamente preciso, es el más compatible para efectuar observaciones que se relacionen al estado de infraestructura y prácticas de consumo en la ciudad.

En efecto, es valioso relacionar resultados específicos con situaciones reales, como es el caso de París, que identifica problemas de consumo y emisión de residuos, así como cuestiona si ciertos indicadores dependen de ciertas actividades como la construcción. Otro estudio similar es el de Hamburgo, que llega a la conclusión de que sus valores de consumo dependen altamente de su condición de ciudad portuaria.

En la mayoría de estudios presentados, se determina el aumento del consumo en valores específicos, como estos estudios utilizan un periodo de tiempo, se compara la variación de resultados en cada indicador, esto es el caso de Budapest, Bogotá, Londres, Los Ángeles y Limerick. En estos se han encontrado variaciones significativas negativas e incluso se han predicho situaciones futuras si no se realizan cambios. Por último, están aquellos estudios que muestran un AFM puntual, y cuya utilidad depende de su comparación con otros estudios, como es el caso de Bruselas, Estocolmo y Suzhou.

Aun así, la mayoría de estudios presentan dificultades, generales o específicos, que necesitan superarse y mejorar. Probablemente la primera dificultad para la realización completa de estudios de Metabolismo Urbano es la falta de información. Tener un análisis del funcionamiento de una ciudad es tarea complicada, y se complica más cuando no hay datos suficientes. Tal vez porque implica conocer a detalle cada actividad y sus flujos respectivos, y esto es más difícil aun en países emergentes, en donde la informalidad prima en la mayoría de aspectos

socioeconómicos. Las oficinas estadísticas se enfocan primero en obtener datos nacionales y no consideran aquellos datos regionales o locales. Es usual que aquellos estudios que utilizan datos locales, hayan sido provistos por entidades locales que han dedicado a recolectar datos en su propia jurisdicción. Esto es común en países desarrollados como Francia, Alemania, Suecia, Inglaterra, etc.

Una dificultad también reside en la variedad de propuestas metodológicas. Se podría decir que cada estudio presenta su propia metodología. Con la excepción de estudios a ciudades europeas, que se basan en una guía metodológica para economías nacionales y adaptada a escalas locales, cada uno de los estudios presenta su propia manera de indicar Inputs y Outputs, y. establecer indicadores. Probablemente una de las razones por la que esto sucede es la competitividad entre investigadores, sin embargo esta diversidad nos permite contribuir a la creación de un modelamiento para estandarizar estos estudios, porque al fin y al cabo, la madurez de esta disciplina dependerá de cuan estandarizadas estén estas medidas, que tan confiable es la información y si los conceptos son claros y específicos.

Otra dificultad presente es la aplicación de estos estudios al contexto social. Siempre se enfatiza la importancia de considerar no sólo los aspectos biofísicos sino también los sociales, pues estos también influyen en el funcionamiento de los sistemas urbanos. Se debe facilitar a aquellos que intervienen directamente con la toma de decisiones, actores políticos, e instituciones.

Lima Metropolitana es la aglomeración urbana más importante del país. Es por ello que se señala la importancia de poder entender los flujos de materia y energía en el sistema definido por sus límites administrativos. El análisis anterior define a grandes rasgos cómo la ciudad funciona, la relación entre las grandes cantidades de materia que entran a la ciudad y el elevado producto bruto interno, cantidad de actividades económicas y alta densidad demográfica. En efecto, la ciudad de Lima tiene oportunidades de mejora al lidiar con sus residuos, patrones de consumo de energía, consumo de agua y manejo de materiales. El análisis de flujo de materiales nos da una idea de cuánto podemos mejorar respecto a otras ciudades que tienen como prioridad implementar políticas ambientales.

REFERENCIAS

Athanassiadis, A., & Bouillard, P. (2013). Contextualizing the Urban Metabolism of Brussels: Correlation of resource use with local factors. *CISBAT 2013. Clean Technology for Smart Cities and Buildings. From Nano to Urban scale.*

Ayres, R. U., & Ayres, L. (Eds.). (2002). A handbook of industrial ecology. *Edward Elgar Publishing.*

Ayres, R. U., & Kneese, A. V. (1969). Production, consumption, and externalities. *The American Economic Review*, 59(3), 282-297.

Barles, S. (2009). Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*, 13(6), 898-913.

Beloin-Saint-Pierre, D., Rugani, B., Lasvaux, S., Mailhac, A., Popovici, E., Sibiude, G., ... & Schiopu, N. (2016). A review of urban metabolism studies to identify key methodological choices for future harmonization and implementation. *Journal of Cleaner Production.*

Boston Consulting Group. (2010). A New World Order of Consumption.

Browne, D., O'Regan, B., & Moles, R. (2009). Assessment of total urban metabolism and metabolic inefficiency in an Irish city-region. *Waste Management*, 29(10), 2765-2771.

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2003). Practical handbook of material flow analysis. *CRC Press.*

Burström, F., Brandt, N., Frostell, B., & Mohlander, U. (1997, September). Material flow accounting and information for environmental policies in the city of Stockholm. In *Analysis for Action. Wuppertal Special 6. Proceedings of the ConAccount Conference. Hrsg. von MF-K. Stefan Bringezu, René Klein, Viveka Palm. Wuppertal. Wuppertal Institut.* S (pp. 136-145).

Burgess, E. W. (1967). *The growth of the city: an introduction to a research project* (pp. 71-78). Springer US.

Campbell, D. E., Brandt-Williams, S. L., & Meisch, M. E. (2005). *Environmental accounting using emergy: Evaluation of the state of West Virginia*. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Atlantic Ecology Division.

Castán Broto, V., Allen, A., Rapoport, E., (2012) Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*.

Chambers, N., Heap, R., Jenkin, N., Lewis, K., Simmons, C., Tamai, B., & Vernon, P. (2002). A resource flow and ecological footprint analysis of Greater London. *Oxford: Best Foot Forward Ltd*.

City Populations (2014). Major Agglomerations of the World. <http://www.citypopulation.de/world/Agglomerations.html>. Consultado en Febrero del 2015.

Clements, F. E. (1916). Plant succession: an analysis of the development of vegetation (No. 242). Carnegie Institution of Washington.

COES Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (2015). Estadística de Operación 2014.

Cottrell, F. (1955). Energy and society: the relation between energy, social change, and economic development. *McGraw New York*.

DIGESA. Dirección General de Salud Ambiental (2005). Resultados del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas, Cuenca Atmosférica de la ciudad de Lima – Callao.

Duvigneaud, P., Denayeyer-De Smet, S., (1977). L'Ecosystème Urbs, in L'Ecosystème Urbain Bruxellois, in Productivité en Belgique. In: Duvigneaud, P., Kestemont, P. (Eds.), Travaux de la Section Belge du Programme Biologique International, Bruxelles, pp. 581e597.

Engels, F. (1872). The Housing Question. *Progress*.

Ferrão, P., & Fernández, J. E. (2013). Sustainable urban metabolism. MIT Press.

Fischer-Kowalski, M. (1998a), Society's Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 1: 61-78.

Fischer-Kowalski, M., Hüttler, W. (1998b), Society's Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 2: 107–136.

Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Giljum, S., Lutter, S., Mayer, A., Bringezu, S., ... & Weisz, H. (2011). Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 855-876.

Geddes, P. (1884). An Analysis of the Principles of Economics. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 12, 943-980.

Georgescu-Roegen, N. (1986). The entropy law and the economic process in retrospect. *Eastern Economic Journal*, 3-25.

Ghezzi, P., Gallardo, J.,(2013) ¿Qué se puede hacer con el Perú? Ideas para sostener el crecimiento económico en el largo plazo. *Fondo Editorial PUCP*.

Global Footprint Network (2015). Frequently Asked Questions. Recuperado de: http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/frequently_asked_questions/#gen1

Graedel, T. E., & Allenby, B. R. (2003). *Industrial Ecology*. 1995. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 7632, 83-187.

Goodland, R. and H. Daly. (1996). Environmental sustainability: Universal and non-negotiable. *Ecological Applications* 6: 1002–1017.

Hammer, M., Giljum, S., Friederich, H., (2003). Material Flow Analysis of the City of Hamburg. "Quo Vadis MFA? Material Flow Analysis, Where do we go? Issues, Trends and Perspectives of Research for Sustainable Resource Use" Workshop, Wuppertal Institut.

Hau, J. L., & Bakshi, B. R. (2004). Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 178(1-2), 215-225.

Hodson, M., Marvin, S., Robinson, B., Swilling, M., (2012). Reshaping Urban Infraestructure. *Journal of Industrial Ecology*.

Huang, S.L., Hsu, W.L., 2003. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning* 63, 61e74.

Huang, S.L., 1998. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis. *Journal of Environmental Management* 52, 39e51.

Huang, S.L., Chen, C.W., 2009. Urbanization and socioeconomic metabolism in Taipei: an emergy synthesis. *Journal of Industrial Ecology* 13, 75e93.

IMP (2013), Plan Regional de Desarrollo Concertado de Lima. Municipalidad Metropolitana de Lima.

Instituto Metropolitano de Planificación – IMP (2014a). I Memoria de Análisis y Diagnóstico PLAM 2035: Introducción

Instituto Metropolitano de Planificación – IMP (2014b). I Memoria de Análisis y Diagnóstico PLAM 2035: Aspectos Sociales.

Instituto Metropolitano de Planificación – IMP (2014c). I Memoria de Análisis y Diagnóstico PLAM 2035: Marco de Planificación.

Instituto Metropolitano de Planificación – IMP (2014d). I Memoria de Análisis y Diagnóstico PLAM 2035: Servicios Básicos.

Instituto Metropolitano de Planificación – IMP (2014e). I Memoria de Análisis y Diagnóstico PLAM 2035: Medio Ambiente

INEI (2010). Perú: Consumo Per-cápita de alimentos 2008-2009.

INEI (2015). Anuario de Estadísticas Ambientales: 2014.

INEI (2016). Compendio Estadístico 2015.

ISO, E. (2004). 14001: 2004. Environmental management systems-Requirements with guidance for use (ISO 14001: 2004).

JICA - Agencia de Cooperación Internacional de Japón (2007). Estudio de Factibilidad de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú. *MTC*.

Kennedy, C. A., J. Cuddihy, and J. Engel Yan. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*

Kennedy, C., & Hoornweg, D. (2012a). Mainstreaming urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 780-782.

Kennedy, C., Baker, L., Dhakal, S., (2012b) Ramaswami, A., Sustainable Urban Systems. An Integrated Approach. *Journal of Industrial Ecology*.

Liang, S., & Zhang, T. (2011). Urban metabolism in China achieving dematerialization and decarbonization in Suzhou. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 420-434.

Lin, P. L. (2006). Urban resilience: Energetic principles and a systems ecology approach. *Graduate Institute of Urban Planning, National Taipei University*.

Linstead, C., & Ekins, P. (2001). Mass balance UK: mapping UK resource and material flows. *Royal Society for Natural Conservation*, 12.

Lotka, A. J. (1920). Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 6(7), 410.

Malthus, T. R. (1888). *An essay on the principle of population: or, A view of its past and present effects on human happiness*. Reeves & Turner.

Marx, K. (1861). Theories of Surplus Value, pt 3. *Progress*.

McKinsey Global Institute, (2011). Urban World: Mapping the economic power of cities. *McKinsey and Company*.

MEM. Ministerio de Energía y Minas (2015). Anuario Estadístico de Electricidad 2014.

MINAG. Ministerio de Agricultura (2015). Anuario Estadístico de Producción Agrícola y Ganadera 2015

MTC. Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Advanced Logistics Group, 2011. Plan de desarrollo de los Servicios de Logística de Transporte.

Ngo, N. S., & Pataki, D. E. (2008). The energy and mass balance of Los Angeles County. *Urban Ecosystems*, 11(2), 121-139.

Odum, E. P., Odum, H. T., & Andrews, J. (1971). Fundamentals of ecology (Vol. 3). *Philadelphia: Saunders*.

Odum, E. P. (1975). Ecology, The Link between the natural and the social sciences. *Holt, Reinhart & Winston*.

Odum, E. P. (1989). Ecology and our endangered life-support systems. *Sinauer Associates*.

Odum, H. T. (1996) Environmental Accounting: EMERGY and environmental decision making.

Odum, H. T. (1998). EMERGY evaluation. *Paper presentado en el taller Internacional de Avances en Estudios de Energia: Flujos de Energia en la ecología y la economía*.

O'Neill, B., M. Dalton, R. Fuchs, L. Jiang, S. Pachauri, and K. Zigovad. (2010). Global demographic trends and future carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(41): 17521–17526.

O'Rourke, D., Connelly, L., & Koshland, C. P. (1996). Industrial ecology: a critical review. *International Journal of Environment and Pollution*, 6(2-3), 89-112.

Ostwald, W. (1909). Energetische grundlagen der kulturwissenschaft (Vol. 16). *Klinkhardt*.

Patten, B., Auble, B., (1981) System theory of the ecological niche. *American Nature*.

Patten, B. C., & Odum, E. P. (1981). The cybernetic nature of ecosystems. *American Naturalist*, 886-895.

Piña, W. H. A., & Martínez, C. I. P. (2014). Urban material flow analysis: An approach for Bogotá, Colombia. *Ecological Indicators*, 42, 32-42.

Pickett, S. T., & Grove, J. M. (2009). Urban ecosystems: What would Tansley do?. *Urban Ecosystems*, 12(1), 1-8.

Pomázi, I., & Szabó, E. (2009). Urban metabolism: The case of Budapest. In *Proceedings of 2008 Conaccount Conference, Urban Metabolism: Measuring Ecological City, Charles University Environment Center, Prague* (pp. 351-375).

Ramaswami, A., Weible, C., Main, D., Heikkila, T., Siddiki, S., Duvall, A., ... & Bernard, M. (2012). A Social-Ecological-Infrastructural Systems Framework for Interdisciplinary Study of Sustainable City Systems. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 801-813.

Raven, P. Johnson, G. (2011). *Biology. McGraw Hill.*

Rosado, L., Niza, S., & Ferrão, P. (2014). A material flow accounting case study of the Lisbon metropolitan area using the urban metabolism analyst model. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 84-101.

Russi, D., Gonzalez, Martinez, A. C., Silva, Macher, J. C., Giljum, S., Martínez, Alier, J., & Vallejo, M. C. (2008). Material Flows in Latin America. *Journal of Industrial Ecology*, 12(5,6), 704-720.

SEDAPAL (2015). Plan Maestro de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado – Tomo II: Estimación Oferta-Demanda de los Servicios.

Steward, J. H. (1968). The concept and method of cultural ecology (pp. 337-344).

Soddy, F. (1911). *Matter and energy.* H. Holt.

Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16(3), 284-307.

United Nations. (2006). *World urbanization prospects: the 2005 revision.* Department

of Economic and Social Affairs. Population Division.

United Nations, (2010). 2009 Revision of World Urbanisation Prospects. UN Population Division.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2012. Sustainable, resource efficient cities—Making it happen! Paris, France: UNEP Division of Technology, Industry and Economics.

Wachsmuth, David. "Three Ecologies: Urban Metabolism and the Society-Nature Opposition." *The Sociological Quarterly*. 53.4 (2012): 506-523.

Wolman, A. (1965) The Metabolism of Cities. *American Cities*.

Zhang, Y., Yang, Z.F., Yu, X.Y., (2009a). Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems: model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling* 220, 1431 - 1442.

Zhang, Y., Yang, Z.F., Yu, X.Y., (2009b). Evaluation of urban metabolism based on emergy synthesis: a case study for Beijing (China). *Ecological Modelling* 220, 1690 – 1696

Zhang, Y. (2013). Urban metabolism: a review of research methodologies. *Environmental pollution*, 178, 463-473.

Zucchetto, J., (1975). Energy, economic theory and mathematical models for combining the systems of man and nature, case study: the urban region of Miami. *Ecological Modelling* , 241 – 268