

## Contenido

4.	Estudio de las opciones de mitigación y de mejora .....	2
4.1	Metodología de contabilidad de emisiones GEI en una microciudad .....	2
4.2.	Escenarios de línea base de emisiones GEI .....	7
4.3.	Escenarios de mejora y mitigación de emisiones GEI .....	7
4.4.	El monitoreo de las opciones propuestas y los indicadores .....	8
4.4.1.	Ecología urbana.....	8
4.4.2.	Manejo integrado del agua.....	11
4.4.3.	Suministro y uso de energía .....	14
4.4.4.	Manejo integrado de residuos .....	16
4.4.5.	Movilidad sostenible (indicadores asociados a los objetivos de planificación de movilidad urbana sostenible) .....	18
4.4.6.	Edificaciones e infraestructura urbana.....	21
	Referencias.....	25

## 4. Estudio de las opciones de mitigación y de mejora

De acuerdo con el IPCC, las ciudades generan el 75% de las emisiones GEI globales, siendo el transporte y las edificaciones los sectores con mayor contribución. Se proyecta que dos tercios de la población del planeta vivirá en áreas urbanas en el año 2050 y la mayor tasa de crecimiento urbano se dará en los países en vía de desarrollo [1]. La manera en que se dé esa expansión de las áreas urbanas será determinante en las emisiones. Asimismo, los cambios en los patrones actuales de uso de recursos, la gestión de estos y sus residuos, así como de la movilidad en las ciudades, resultarán fundamentales para lograr las metas en mitigación de emisiones. Por otra parte, las variaciones y el cambio del clima están incidiendo en la forma en que se diseñan y operan las ciudades. Consideraciones relativas al buen uso de suelo, a la buena gestión de los recursos naturales y de los residuos, así como valoración de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos deben acompañar la oferta de movilidad, vivienda y equipamientos.

En este contexto, el presente capítulo estudia las opciones de mitigación y mejora de los entornos urbanos. Para el efecto, está organizado de la siguiente manera: inicialmente se presenta la metodología empleada para la contabilidad de emisiones en una microciudad, tarea que no es evidente, máxime si se piensa en evaluar opciones de mitigación y mejora, pues el inventario agrupa las emisiones de diferentes sectores y actividades. En las dos secciones siguientes se discuten de manera corta las metodologías para la estimación de líneas base a partir de *drivers* tradicionales como la población y el PIB, y para la construcción de escenarios de mejora con medidas que llevarían a menor huella de carbono, mejor capacidad de adaptación y oferta de mejores condiciones de vida. Las lógicas y métodos propuestos fueron aplicados en los casos de estudio, para los cuales se presentan los resultados de los inventarios, líneas base y escenarios de mejora. Para terminar, se propone el uso de los indicadores a través de las diferentes etapas de evolución formuladas desde los sectores para el monitoreo, reporte y verificación de medidas de mitigación, adaptación y mejora. Al respecto es importante precisar que, como se señala en el Capítulo 2, los indicadores propuestos son aplicables a nivel de ciudad y así se presentan en esta última sección, aunque los énfasis en su diseño y valores de referencia se han pensado para nivel de proyecto urbano.

### 4.1 Metodología de contabilidad de emisiones GEI en una microciudad

Los inventarios de emisiones GEI pueden realizarse con varios objetivos, en función de lo cual varían las metodologías para el cálculo y agrupación de las emisiones. Presentamos dos ejemplos a continuación, así como el enfoque planteado para este estudio.

- Inventario de emisiones GEI de la microciudad como insumo para los inventarios departamentales o nacionales

El enfoque metodológico está dado por las guías del IPCC para inventarios nacionales de emisiones. Las emisiones GEI se contabilizan en el año y en el sector en el que se generan. Se establecen cuatro sectores principales para agrupación de las emisiones: i) energía, ii) procesos industriales y uso de productos, iii) agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, y iv) residuos.

Las guías del inventario nacional [2] proveen el método de cálculo para cada gas contaminante y fuente de emisión, y definen valores propios adoptados por el país para la estimación de las emisiones, como los factores de emisión e índices de calentamiento global, entre otros.

En este caso se busca compatibilidad entre las metodologías empleadas en los diferentes niveles, desde lo micro o local, hasta lo nacional. Sin embargo, la aplicación de la metodología de estimación de emisiones a nivel nacional no es directamente aplicable para estimación de emisiones en microciudades.

Existen diferencias en relación con el nivel de agregación de la información disponible para el cálculo de emisiones, por lo que usar una metodología de arriba hacia abajo en una microciudad no es posible en muchos casos.

Otras dificultades a nivel de microciudad son la identificación de todas las fuentes de emisión, dada la diversidad de actividades que se puedan desarrollar dentro de la microciudad; y la disponibilidad de información requerida para estimar las emisiones a nivel de fuente.

- Inventario de emisiones GEI como insumo para el diseño de programas de mitigación de emisiones

La estimación de las emisiones GEI de una microciudad con la finalidad de identificar cuáles son las actividades y dinámicas de la población que están generando las mayores emisiones requiere un enfoque más amplio que el utilizado en los inventarios nacionales de emisiones. Bajo este objetivo, los inventarios son herramientas para entender cuáles son los factores que causan las emisiones y en qué punto de la cadena de generación de las emisiones se podría intervenir para evitarlas o mitigarlas.

Resultan útiles enfoques más integrales para la contabilidad de emisiones como podrían ser los de análisis de ciclo de vida, o aproximaciones híbridas. Dentro de las emisiones contabilizadas se pueden considerar las que se generan directamente por una fuente que se ubique dentro de la microciudad y aquellas causadas por las dinámicas de la microciudad, pero que se generan fuera del área geográfica que ocupa la microciudad. Además, se pueden contabilizar emisiones generadas en el mismo año del análisis, o las emisiones asociadas a diferentes etapas del ciclo de vida anualizadas por el periodo de vida útil de lo que se esté evaluando.

Este enfoque provee información más completa sobre las posibles intervenciones y opciones de mitigación de emisiones. Dado que el objetivo es el de identificar en dónde intervenir, la agrupación de las emisiones responde a los sectores de la administración pública desde donde podrían gestionarse y no solo al tipo de proceso que las causa.

Las metodologías para microciudades o metodologías basadas en la comunidad [3] tienen diferentes objetivos y alcances en cuanto a los sectores y fuentes de emisión consideradas. Para este estudio se adoptó un enfoque híbrido, y se definieron los lineamientos que se mencionan a continuación (ver Tabla 1):

- a) Sector: en el primer nivel las emisiones se clasifican según los sectores de análisis de este estudio: ecología urbana, manejo integrado del agua, suministro y uso de energía, manejo integrado de residuos, movilidad sostenible, edificaciones e infraestructura urbana. En un segundo nivel las emisiones se clasifican por subsectores de acuerdo con las diferentes fuentes de emisión identificadas en cada caso.
- b) Etapa del ciclo de vida de la microciudad a la que se atribuyen las emisiones: para este estudio se consideraron las de construcción y operación. También podrían incluirse las de la fase final de la microciudad en cuestión.
- c) Tipo de proceso que genera las emisiones o la absorción de emisiones (v.g., combustión, emisiones fugitivas, procesos biológicos, captura de biomasa) y la actividad del sector a las que se asocian.
- d) Gases considerados: se incluyeron en el análisis las emisiones de dióxido de carbono equivalente, agrupando las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso.
- e) Límites del sistema de análisis: se clasificaron las emisiones teniendo en cuenta si se generan dentro de la ciudadela, o si se causan en la ciudadela, pero se generan en otro lugar.
  - In-situ: son las emisiones que se generan dentro de los límites geográficos de la microciudad.
  - Fuera del sitio: son las emisiones causadas por las actividades de la microciudad, pero que se generan fuera de sus límites geográficos.

- Híbrido: comprende emisiones in-situ y fuera del sitio. En este grupo se clasifican usualmente las emisiones asociadas al transporte de los habitantes.

Las emisiones por cada proceso se estimaron siguiendo las metodologías del IPCC para inventarios de emisiones y en los casos en que aplica se utilizaron los factores de emisión adoptados por Colombia en el Segundo Reporte Bienal de Actualización ante la CMNUCC (BURII) [2]. Las estimaciones sobre captura y almacenamiento de carbono, principalmente relacionadas con el sector de ecología urbana, también se calcularon siguiendo las directrices del IPCC [4].

En este estudio no se abarcaron todas las fuentes de emisiones asociadas a las microciudades. No se incluyeron las emisiones GEI derivadas del consumo de bienes dentro de la microciudad, las del transporte de carga, ni las relacionadas con la producción de alimentos.

Tabla 1. Fuentes de emisión que se están considerando en el análisis.

Sector (subsector)	Etapa ciclo de vida microciudad	Proceso emisión/sumidero y actividad a la que se asocian las emisiones	Gases	Límites del sistema de análisis
<b>Sector: Ecología urbana</b>				
Uso y cobertura del suelo	Operación	- Captura de carbono en biomasa y suelo.	CO <sub>2</sub>	<b>In-situ:</b> captura de carbono en biomasa y suelo dentro de la microciudad.
Cambio de uso y cobertura del suelo				
<b>Sector: Manejo integrado del agua</b>				
Tratamiento y distribución de agua potable (para uso residencial, comercial e institucional)	Construcción	- Combustión + IPPU: producción de los materiales en la industria.	CO <sub>2</sub>	<b>In-situ:</b> transporte para instalación de redes de distribución de Ciudad Verde. <b>Fuera del sitio:</b> producción de materiales.
	Operación	- Combustión: por generación de electricidad.	CO <sub>2</sub>	<b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad para bombeo y potabilización.
Manejo de escorrentía	Construcción	- Combustión + IPPU: producción de los materiales en la industria.	CO <sub>2</sub>	<b>In-situ:</b> transporte para instalación de red para manejo de escorrentía. <b>Fuera del sitio:</b> producción de materiales.
	Operación	- Combustión: por generación de electricidad.	CO <sub>2</sub>	<b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad para bombeo.
Manejo de agua residual (proveniente de usos residencial, comercial e institucional)	Construcción	- Combustión + IPPU: producción de los materiales en la industria.	CO <sub>2</sub>	<b>In-situ:</b> transporte para instalación de red para manejo de agua residual. <b>Fuera del sitio:</b> producción de materiales.
	Operación	- Combustión: por generación de electricidad. - Procesos biológicos: descomposición de materia orgánica.	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	<b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad para bombeo. <b>Fuera del sitio:</b> descomposición de materia orgánica de aguas residuales.
<b>Sector: Suministro y uso de energía</b>				
Generación eléctrica descentralizada	Operación	- Combustión: por generación de electricidad.	CO <sub>2</sub> (reducción)	<b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad.
Producción de electricidad y calor conjunta	Operación	- Combustión: por generación de electricidad y calor	CO <sub>2</sub> (reducción)	<b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad y de calor
Alumbrado público	Operación	- Combustión: por generación de electricidad.	CO <sub>2</sub>	<b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad.
<b>Sector: Manejo integrado de residuos</b>				
Manejo de lodos de agua residual	Operación	- Procesos biológicos: digestión anaerobia.	CO <sub>2</sub> *	<b>Fuera del sitio:</b> gestión de los lodos.

Sector (subsector)	Etapa ciclo de vida microciudad	Proceso emisión/sumidero y actividad a la que se asocian las emisiones	Gases	Límites del sistema de análisis
Transporte de residuos al sitio de disposición final	Operación	- Combustión: por uso de diésel.	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	<b>Híbrido:</b> transporte de residuos sólidos domiciliarios, de barrido, de poda y de corte de césped que se generan en la microciudad y se disponen fuera de la microciudad.
	Construcción	- Combustión: por uso de diésel.		<b>Híbrido:</b> transporte de residuos sólidos de demolición y construcción de la etapa inicial de construcción.
Disposición final de residuos sólidos (provenientes de usos residenciales y municipales)	Operación	- Procesos biológicos: descomposición anaerobia. - Combustión de biogás*	CH <sub>4</sub> CO <sub>2</sub> *	<b>Fuera del sitio:</b> descomposición de residuos sólidos generados en la microciudad, pero que se disponen fuera de la microciudad.
<b>Sector: Movilidad sostenible</b>				
Transporte urbano de pasajeros	Operación	- Combustión: por uso de diésel, gasolina y gas natural.	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	<b>Híbrido:</b> transporte de habitantes de la microciudad. Los viajes tienen como origen o destino la microciudad, pero involucran áreas fuera de la microciudad.
<b>Sector: Edificaciones e infraestructura urbana</b>				
Edificaciones Residenciales	Construcción	- Combustión: extracción de materia prima. - Combustión + IPPU: producción de los materiales en la industria. - Combustión: energía consumida en obra. - Combustión: transporte de materiales para la obra.	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	<b>Híbrido:</b> transporte de materiales hacia la microciudad. <b>Fuera del sitio:</b> extracción y producción de materiales.
	Operación	- Combustión: por demanda de electricidad y gas natural (para uso residencial).	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	<b>In-situ:</b> consumo de gas natural residencial. <b>Fuera del sitio:</b> generación de electricidad.
Infraestructura urbana	Construcción	- Combustión: extracción de materia prima. - Combustión + IPPU: producción de mezclas asfálticas. - Combustión: de energía consumida en obra	CO <sub>2</sub>	<b>Fuera del sitio:</b> extracción y producción de materiales.

\* El CO<sub>2</sub> liberado en la combustión de CH<sub>4</sub> proveniente del relleno sanitario y lodos de agua residual es de origen biogénico, por lo que no se tiene en cuenta dentro del inventario de emisiones.

## 4.2. Escenarios de línea base de emisiones GEI

El escenario de línea base de emisiones GEI permite representar las trayectorias futuras probables de emisiones que se tendrían en ausencia de medidas de mitigación. Mediante la comparación entre el escenario de línea base y los escenarios con medidas de mitigación se estima el potencial de reducción de emisiones de las intervenciones. Partiendo de la caracterización de la microciudad, sus actividades y emisiones en un año base, éstas se proyectan anualmente durante el periodo de análisis seleccionado.

Los escenarios futuros de cada sector se modelan considerando cómo cambian en el futuro los factores que determinan las emisiones. Los escenarios inerciales se construyen incorporando únicamente los cambios esperados en población y en nivel de actividad, esta última en función de los escenarios macroeconómicos (PIB y PIB per cápita); y suponiendo constantes otros aspectos como la intensidad de carbono de la actividad que se esté representando. Análisis más completos para construir los escenarios de referencia pueden incluir cambios en las eficiencias de los procesos y en el desempeño de las tecnologías, ligados a los escenarios macroeconómicos, o cambios en los patrones de comportamiento. Existen otros aspectos como las políticas y programas sectoriales que también determinan las emisiones sectoriales, y por lo tanto se incorporan dentro del escenario de línea base.

Mediante la suma de los escenarios sectoriales se obtiene el escenario de línea base de emisiones GEI de la microciudad. La aplicación de la metodología en cada sector en los casos de estudio se presenta en el Capítulo 6 del informe.

## 4.3. Escenarios de mejora y mitigación de emisiones GEI

A partir de la caracterización del estado actual de la microciudad, considerando cada uno de los aspectos con los cuales se define la sostenibilidad, es posible priorizar las áreas de intervención y el tipo de acciones que podrían implementarse. En este estudio se proponen intervenciones para reducir la huella de carbono, para aumentar la captura y almacenamiento de carbono en biomasa, para restaurar y proteger la estructura ecológica principal, para reducir la vulnerabilidad ante efectos del cambio climático y para mejorar otros aspectos fundamentales del desarrollo sostenible.

Las intervenciones propuestas se evalúan mediante un análisis de costo-eficiencia. Para las medidas de mitigación de emisiones GEI, se calcula el costo neto de implementar las acciones y su potencial de mitigación durante todo el periodo de análisis. El costo neto ( $C_i$ ) es la diferencia entre el costo en un escenario con medida ( $C_m$ ) y uno sin medida ( $C_{lb}$ ), considerando el valor presente neto de los costos de inversión, operación y mantenimiento. El potencial de mitigación ( $ECO_{2eqi}$ ) es la diferencia en las emisiones entre el escenario de línea base ( $E_{lb}$ ) y un escenario con la implementación de la medida ( $E_m$ ).

$$C_i = C_m - C_{lb}$$

$$ECO_{2eqi} = E_{lb} - E_m$$

$$CE_i = \frac{C_i}{ECO_{2eqi}}$$

El indicador de costo-eficiencia ( $CE_i$ ) en términos de tonelada de  $CO_{2-eq}$  abatida facilita la comparación de las intervenciones dentro de un mismo sector y entre sectores.

Para las medidas de adaptación se realiza un análisis de costo neto y se estima su efecto en una o más variables dependiendo de los beneficios que éstas generen. Hacen parte de los impactos en adaptación

considerados en los análisis los siguientes: ahorro en agua potable, escorrentía regulada, uso de fuentes alternativas de agua, reducción de temperatura e incremento en evapotranspiración. Dada la diversidad en los impactos de estas medidas, la comparación entre opciones no es directa.

Adicionalmente para todas las intervenciones propuestas se realiza un análisis cualitativo de posibles impactos (positivos y negativos) que éstas puedan generar en otras áreas del desarrollo sostenible. Dentro del área social se consideran impactos sobre empleo, pobreza, salud, educación, seguridad alimentaria, equidad y confort. En los aspectos económicos se considera los potenciales impactos en crecimiento económico, productividad y oferta de recursos renovables naturales. Finalmente, dentro de los aspectos ambientales se incluyen potenciales efectos de cada medida en biodiversidad, ruido, suelo, calidad del aire y calidad del agua.

A partir de las medidas de mitigación evaluadas en cada sector se definen portafolios con diferentes combinaciones posibles de las medidas. En esta agrupación se tiene en cuenta el tipo de interacciones que pueda existir entre las diferentes medidas de mitigación. A su vez, los escenarios de mitigación sectoriales se agrupan y conforman el escenario de mitigación de emisiones GEI de la microciudad.

#### **4.4. El monitoreo de las opciones propuestas y los indicadores**

Para monitorear la evolución de las emisiones de un proyecto urbano y, además, de las opciones de adaptación y mejora, se propone la utilización de la batería de indicadores que se presentó en el Capítulo 2, acorde con la metodología propuesta y detallada en el Capítulo 1. En este último, cada sector propuso etapas de desarrollo con miras a avanzar en la sostenibilidad de un proyecto urbano. A cada etapa se le asociaron indicadores que permiten monitorear reportar y verificar la evolución de estos proyectos. En esta sección se presentan dichos indicadores.

Hay un aspecto para tener en cuenta, señalado en el Capítulo 8 de este reporte, y es la importancia de gestión de estos proyectos tanto en su etapa de planeación como en la de operación. El logro de desarrollos urbanos sostenibles requiere una tarea continuada y firme de revisión y análisis. A su vez, se deben concebir las instancias para el monitoreo, reporte y verificación de los objetivos con la participación de todos los actores involucrados. La planeación urbana y el desarrollo de las ciudades son procesos dinámicos en permanente evolución y de esta manera deben ser gestionados.

##### **4.4.1. Ecología urbana**

Los indicadores correspondientes al componente de “ecología urbana” se cuantifican y ponderan en relación con las tipologías de áreas verdes antes descritas. La disponibilidad y suficiencia de los diversos tipos de áreas correspondientes a las diversas categorías se pondera mediante indicadores cuantitativos básicos ( $m^2$  y  $m^2/habitante$ ). La funcionalidad, tanto social como ecológica, de cada una de las áreas está determinada por su dimensión, ubicación relativa y características específicas, las cuales se ponderan mediante tres indicadores cualitativos (accesibilidad social, índice de naturalidad, conectividad ecológica). Adicionalmente, se incluyen indicadores relativos a dos servicios ecosistémicos específicos: captura y almacenamiento de  $CO_2$  y regulación climática local.

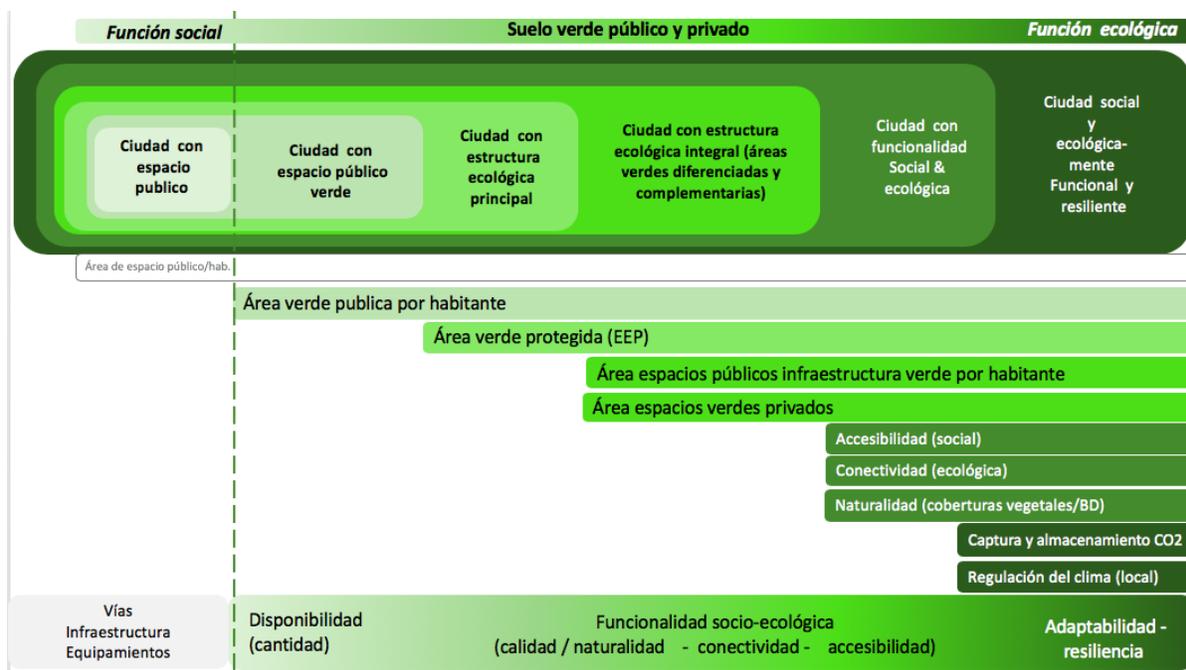


Figura 1. Indicadores enfoque Ciudad sensible a los ecosistemas.

La mejora cuantitativa y cualitativa que permite pasar de la “Ciudad con espacio público” a la “Ciudad social y ecológicamente segura y sostenible” se logrará mediante la mejora en los valores de cada indicador, así como mediante la acumulación y complementariedad entre indicadores. La ponderación de los valores actuales de los diversos indicadores, en caso de ser posible su ponderación - línea base y modelación de escenarios posibles - permite identificar necesidades y formular opciones de mejora de la funcionalidad social y/o ecológica de los diversos tipos de espacios verdes; así como establecer valores meta de mejora en el tiempo, cuantificar los costos, establecer y sustentar los *trade-offs* y decisiones de política requeridos para alcanzar las metas de mejoramiento previstas.

Tabla 2. Indicadores enfoque Ciudad sensible a los ecosistemas

	Sub-Categoría	Indicador	Descripción	
	Ciudad con espacio público	Área de espacio público total /habitante	Mide la disponibilidad de espacio público total en metros cuadrados por cada habitante en el área de análisis. (vías, áreas verdes, equipamientos públicos)	0
Cantidad/ disponibilidad	Ciudad con espacio público verde	Área verde pública por habitante	Mide la disponibilidad de <b>espacio público verde total</b> en metros cuadrados por cada habitante en el área de análisis.	1
	Ciudad con estructura ecológica principal	Área verde protegida (EEP)	Mide la disponibilidad neta de <b>Áreas Urbanas Protegidas (EEP)</b> en relación con el espacio público verde total del área de análisis, como base para la oferta ecosistémica.	2
	Ciudad con estructura ecológica integral (áreas verdes diferenciadas y complementarias)	Área espacios públicos infraestructura verde por habitante	Mide la disponibilidad de los otros espacios verdes públicos en el área de análisis	3
		Área espacios verdes privados	Mide la disponibilidad de espacios verdes privados complementarios a la función ecológica en el área de análisis	4
Calidad/ funcionalidad	Ciudad con funcionalidad social y ecológica	Accesibilidad social	Mide la accesibilidad de la población a los diferentes tipos de espacios verdes, con el fin de ser además un indicador de equidad.	5
		Conectividad ecológica	Identifica la conectividad entre (parches de hábitat) <b>tipos de área verde "natural"</b> como un proxy de la facilidad con que las especies representativas se pueden mover entre estos.	6
		Índice de Naturalidad	Establece el grado de naturalidad de <b>cada</b> tipo de área verde (pública) dependiendo de la cantidad y calidad de las coberturas vegetales	7
	Ciudad social y ecológicamente funcional y resiliente	Captura y almacenamiento de carbono	Mide la eliminación en toneladas de CO <sub>2</sub> , como un servicio ecosistémico proveído por los diferentes espacios verdes urbanos.	8
		Regulación Clima (Local)	Mide los cambios en la temperatura local debido al almacenamiento de calor en diferentes superficies que alteran los flujos de energía.	9

Asimismo, en el futuro, y dependiendo de la disponibilidad de información, se podrían incluir nuevos indicadores cualitativos relacionados con servicios ecosistémicos adicionales (regulación, soporte, percha para aves migratorias, etc.) A su vez, vale la pena anotar que el aumento en la cantidad y el incremento en la calidad de los espacios verdes urbanos están asociados con mejoras en el paisaje urbano, el valor del uso del suelo, la salud física y mental de los ciudadanos; mejoras difíciles de estimar cuantitativamente, pero de ninguna manera despreciables.

- **Ciudad con espacio público**

Dado que esta etapa incluye la disponibilidad total de espacios públicos abiertos naturales y construidos, como vías, infraestructura de energía, agua y transporte, equipamientos sociales, espacios públicos verdes y recreativos, no se hace una ponderación ni se proponen medidas de mejoras para este indicador agregado. Las medidas se relacionan exclusivamente con la cantidad (disponibilidad) y la calidad de los espacios verdes, de manera que, según su categoría, pueda incrementarse su funcionalidad social y ecológica.

- **Ciudad con espacio público verde**

Para esta fase se aborda la disponibilidad específica de área verde pública total, la cual incluye áreas protegidas y áreas verdes generadas en los procesos de urbanización, ponderada como cantidad total (metros cuadrados) y como la disponibilidad por habitante ( $m^2/hab$ ). Las mejoras en esta etapa se relacionan por consiguiente con incremento en los valores de ponderación, los valores resultantes se ponderan en relación con valores de referencia propuestos por la OMS de  $15 m^2/habitante$ .

- **Ciudad con estructura ecológica principal**

Esta fase el mejoramiento ecológico urbano supone el incremento específico de espacios verdes urbanos - correspondientes a las áreas protegidas declaradas y delimitadas o a otros elementos de la estructura ecológica principal - como resultado de declarar más áreas protegidas urbanas o incrementar el área de protección y manejo de elementos de la estructura ecológica principal, en particular de los asociados al sistema hídrico (p. ej., quebradas y humedales).

- **Ciudad con estructura ecológica integral (áreas verdes diferenciadas y complementarias)**

En esta fase el mejoramiento se refiere al incremento en la disponibilidad de áreas verdes funcionales generadas en el proceso de desarrollo urbano. Se excluyen áreas verdes asociadas al sistema vial (i.e., separadores y andenes), por su muy baja funcionalidad social y ecológica. El mejoramiento se refiere, por una parte, al incremento de áreas verdes destinadas a la conformación de parques metropolitanos, parques urbanos zonales y vecinales y alamedas, excluidas en lo posible las zonas duras ubicadas en su interior (p.ej., canchas deportivas, caminos peatonales y ciclovías) Este incremento se puede lograr ajustando la normatividad relativa a cesiones en los procesos de urbanización. La mejora se refiere por otra parte a la preservación, incremento y ponderación de las áreas verdes privadas, en particular las que forman parte de desarrollos institucionales y recreativos (p. ej., centros educativos, clubes campestres, parques cementerios, etc.). En relación con las áreas verdes públicas, las mejoras se estiman en  $m^2$  y en  $m^2/habitante$  y se ponderan en relación con el indicador mínimo aceptable de  $10 m^2/habitante$  propuesto por la OMS; en el caso de las áreas verdes privadas, la mejora se pondera cuantitativamente, asociada a indicadores de funcionalidad socio-ecológica.

- **Ciudad con funcionalidad social y ecológica**

Esta fase, la mejora se refiere al incremento en la calidad de los espacios verdes, incremento relativo a su funcionalidad social en términos de accesibilidad, e incremento en su funcionalidad ecológica, asociada a

la conectividad y al índice de naturalidad. En el primer caso, la mejora se relaciona con la distribución de las áreas verdes y su ubicación en relación con los potenciales usuarios. La mejora en conectividad se relaciona no solo con incremento de las áreas protegidas sino con restauración ecológica de las mismas, de manera que su tamaño, ubicación y vegetación resulten aptas para la funcionalidad y conectividad ecológica.

- **Ciudad social y ecológicamente funcional y resiliente**

En esta etapa la mejora se relaciona con el incremento de coberturas forestales en las diversas categorías de espacios verdes, de manera que se incremente la capacidad de prestación de servicios ecosistémicos específicos de mitigación y control micro climático. La mejora se refiere a la disminución de áreas duras y al incremento de la cobertura forestal al interior de las diversas categorías de áreas verde.

#### 4.4.2. Manejo integrado del agua

Para las seis etapas del marco de transición hacia un manejo sostenible del agua se formularon un conjunto de indicadores con el propósito de evaluar los objetivos específicos asociados con estas, como se puede observar en la Figura 2.

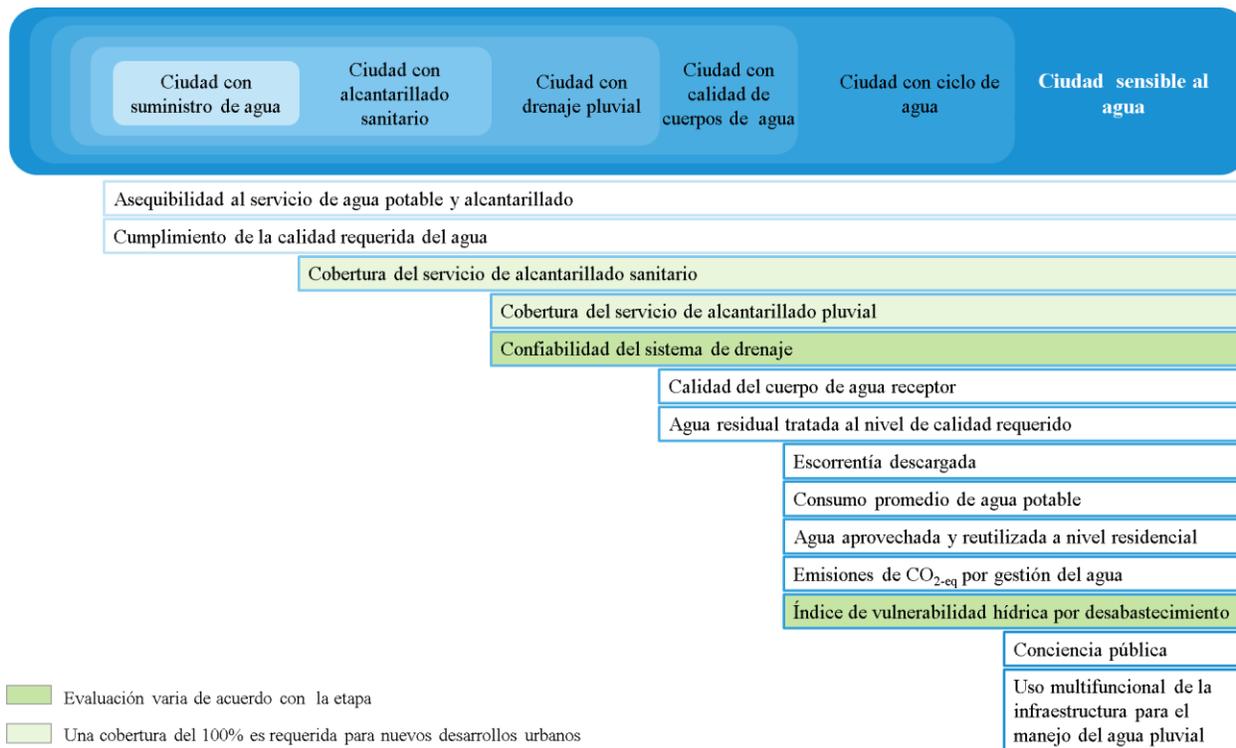


Figura 2. Indicadores seleccionados para el análisis de las etapas de la gestión del agua en las ciudades

Las primeras tres etapas involucran la cobertura de los sistemas de suministro y saneamiento en el perímetro del desarrollo urbano. Esta debe garantizarse para todo nuevo desarrollo y corresponde a un nivel de avance mínimo para el bienestar de los habitantes de un área urbana. A partir de la etapa de ciudad con calidad de cuerpos de agua se propuso analizar de manera directa (p.ej., a través del indicador de calidad del cuerpo de agua receptor) e indirecta (p.ej., a través del indicador agua residual tratada al nivel de calidad requerido) el uso de los recursos naturales y el impacto del área urbanizada en los cuerpos de agua receptores.

Finalmente, en la etapa de ciudad sensible al agua se incluyeron indicadores para evaluar directamente la relación de los habitantes y del territorio con el ciclo del agua. Adicionalmente, es importante considerar que la valoración de los indicadores puede variar de acuerdo con la etapa analizada. Por ejemplo, la confiabilidad del sistema de drenaje en ciudad con drenaje pluvial corresponde a una confiabilidad para eventos típicos de diseño de la red local. Ya que el objetivo en esta etapa es la protección ante encharcamientos e inundaciones. Pero para etapas más avanzadas el análisis de esta confiabilidad debe incluir eventos asociados al cambio climático puesto que una ciudad sensible al agua debe ser resiliente a este tipo de eventos. En las siguientes secciones se detallan los objetivos e indicadores de cada etapa.

- **Ciudad con suministro de agua**

Esta etapa comprende el suministro de agua potable a la población urbana con la cantidad y calidad adecuadas. Entre los indicadores relevantes la evaluación de la infraestructura asociada al suministro del agua se incluyeron la cobertura del sistema en términos de capacidad y la calidad del agua potable suministrada. Teniendo en cuenta que el suministro de agua debe estar garantizado para cualquier desarrollo urbano, se propuso el indicador de asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado con el fin de cuantificar la asequibilidad de los habitantes a la provisión del recurso. Este indicador permite establecer si existen limitaciones en el acceso al servicio debido a los costos de este. Adicionalmente, se propuso el cumplimiento de la calidad requerida del agua como indicador para evaluar la calidad del agua tanto para usos potables como no potables.

- **Ciudad con alcantarillado sanitario**

Esta etapa requiere de un sistema de alcantarillado sanitario que permita el drenaje de las aguas residuales urbanas. Se consideró la cobertura del servicio de alcantarillado sanitario como el indicador relevante para la evaluación de esta etapa. Este pretende cuantificar el porcentaje de la población con acceso al servicio de alcantarillado sanitario (i.e., recolección y transporte de las aguas residuales), con el fin de establecer si existe un déficit en la prestación del servicio.

- **Ciudad con drenaje pluvial**

Esta etapa debe contar con un sistema de alcantarillado pluvial que permita el drenaje de la escorrentía. Entre los indicadores relevantes para la evaluación de la infraestructura de drenaje se incluyó la cobertura del sistema en términos de capacidad y su desempeño en la protección contra inundaciones. De esta manera, se consideró la cobertura del servicio de alcantarillado pluvial como el indicador relevante para la evaluación de esta etapa. Este busca cuantificar el porcentaje del área en que la escorrentía generada es manejada mediante sistemas de drenaje para establecer si existe déficit en la infraestructura. Adicionalmente, se propuso el indicador de confiabilidad en el sistema de drenaje con el fin de evaluar su desempeño en términos de su confiabilidad. Esta se define como el grado en el que un sistema minimiza el nivel de frecuencia de eventos de falla durante su vida útil cuando está sujeto a condiciones normales de operación.

- **Ciudad con calidad de cuerpos de agua**

En esta etapa se reconoce el deterioro de la calidad de los cuerpos de agua receptores, por lo que se tiene un enfoque en la recuperación y protección de dichos cuerpos hídricos. En primer lugar, para la evaluación de esta etapa se consideró el indicador de calidad del cuerpo de agua receptor. Este evalúa la calidad del agua del cuerpo de agua (i.e., cuerpo de agua donde se descargan las aguas residuales y la escorrentía con o sin algún tipo de tratamiento), con el fin de identificar problemas de contaminación en el mismo y estrategias para su recuperación. Por otro lado, se adoptó el indicador de agua residual tratada al nivel de calidad requerido, que pretende cuantificar la proporción de aguas residuales domésticas que son tratadas

al nivel de calidad requerido. Mediante este indicador se evalúa si el tratamiento realizado es adecuado al considerar la calidad del cuerpo de agua receptor.

- **Ciudad con ciclo del agua**

En esta etapa se reconocen los límites en el uso de los recursos naturales por lo que se centra en el manejo de la demanda y en cerrar los ciclos del agua y de nutrientes [5]. Por este motivo se incluyeron distintas escalas del consumo del agua dentro de los indicadores seleccionados, es decir, se consideró desde la cuenca hasta los hábitos de consumo dentro de una vivienda. En primer lugar, se propuso que el uso y sustitución de agua potable a nivel residencial sea analizado a partir del consumo per-cápita promedio de agua potable, y el agua aprovechada y reutilizada. Por una parte, el indicador de consumo residencial promedio de agua potable evalúa la eficiencia en el uso del agua para identificar si se requieren acciones para incrementar la sostenibilidad en los casos en los que el consumo per-cápita exceda lo requerido para suplir las necesidades de consumo directo e higiene. Por otro lado, el porcentaje de agua aprovechada y reutilizada a nivel residencial permite reconocer la proporción de fuentes alternas (i.e., agua lluvia y aguas grises) destinadas a sustituir usos no potables, lo que significa una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales.

Por otro lado, el índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento evalúa a nivel de cuenca la relación entre la oferta y la demanda de agua. En este sentido, se reconocieron dinámicas por fuera de los límites del desarrollo urbano que pueden impactar la disponibilidad de agua al interior de este. Adicionalmente, la oferta de agua en el indicador se aproximó a partir del promedio anual de las fuentes de agua principales al interior de la cuenca hidrográfica. Por lo que evidencia situaciones en las que se depende de fuentes externas de agua y en las que, por lo tanto, hay una interrupción en el ciclo hidrológico que puede afectar otras cuencas. De manera similar el indicador de escorrentía descargada se basó en la diferencia entre la escorrentía descargada antes y después del desarrollo con el objetivo de evaluar posibles afectaciones en el ciclo hidrológico ya sea por el incremento o la disminución del caudal de escorrentía del área. Asimismo, en esta etapa se incluyó el indicador de emisiones de CO<sub>2-eq</sub> por gestión del agua. Mediante este indicador se analizan las emisiones por metro cúbico de agua producto de la distribución y consumo de agua potable, así como de la recolección, tratamiento y vertimiento de aguas residuales y pluviales. Lo cual permite estimar la contribución de este sector a las emisiones totales del desarrollo urbano y establecer una valoración sobre la sostenibilidad acorde con el impacto de la huella de carbono.

- **Ciudad sensible al agua**

Los objetivos de esta etapa incluyen equidad, a través de la disminución de los riesgos asociados a la gestión del agua, y resiliencia al cambio climático, por lo que debe contarse con una infraestructura multifuncional que permita incrementar esta resiliencia a partir de su operación en el manejo de eventos extremos y el refuerzo de comportamientos en la población que evidencien conciencia sobre el manejo adecuado de los recursos hídricos [5]. Por este motivo, para el análisis de esta etapa se propusieron los indicadores de conciencia pública y uso multifuncional de la infraestructura para el manejo del agua pluvial. Mediante el indicador de conciencia pública se cuantifica la responsabilidad que sienten los habitantes por participar en la toma de decisiones locales sobre el agua y en la conservación del recurso. Por otro lado, el uso multifuncional de la infraestructura para el manejo del agua pluvial permite valorar la integración de las áreas destinadas al control de la escorrentía con la población y los ecosistemas. En esta medida un mayor uso multifuncional significa una menor interrupción de las dinámicas naturales dado el soporte a los ecosistemas por parte de esta infraestructura y una mayor conciencia de la población sobre el ciclo del agua. A su vez, el análisis de la resiliencia involucra modificar la manera en que algunos indicadores propuestas para etapas previas se analizan. En este caso indicadores como índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento y confiabilidad del sistema de drenaje deben integrar eventos extremos y/o asociados

con el cambio climático, de manera que en el análisis la vulnerabilidad del territorio al desabastecimiento y la operación del sistema de drenaje se evalúe la capacidad de los sistemas propuestos para operar en este tipo de escenarios.

#### **4.4.3. Suministro y uso de energía**

Previamente se definió la visión de una ciudad con suministro limpio, eficiente y confiable a través de etapas que permiten demostrar progresivamente la transición de una ciudad enfocada en el suministro de electricidad y gas, hacía una ciudad que integra diferentes elementos de gestión de demanda y generación descentralizada para gestionar de manera eficiente e inteligente los recursos de energía de los que dispone la ciudad de tal manera que los usuarios sean suministrados con energía limpia y con calidad de suministro apropiada. Con el fin de dar seguimiento al progreso de una ciudad a la luz de las diferentes etapas propuestas y los diferentes objetivos que estas involucran, se propone una serie de indicadores que permitirán evaluar el estado de la ciudad a la luz de esta visión.

- **Ciudad con suministro de electricidad y gas por red**

El objetivo de esta etapa consiste en garantizar el acceso a servicios energéticos esenciales a los diferentes usuarios que se encuentran en la ciudad. Se definen como servicios básicos los servicios de electricidad y gas natural. Como se destacó anteriormente, se espera que un macroproyecto en su periodo de planeación cuente con todos los estudios de viabilidad y recursos para construir las redes necesarias para garantizar el acceso al suministro de estos servicios. Sin embargo, en una ciudad y sus áreas periféricas pueden existir zonas, sobre todo rurales, para las cuales el acceso no es garantizado. Por lo tanto, se consideran los indicadores de Accesibilidad al servicio de electricidad y Accesibilidad al servicio de gas natural como métricas esenciales de esta etapa. Una vez garantizado el acceso, se considera que el uso de estos servicios debe ser asequible para los usuarios, tal que puedan satisfacer sus necesidades energéticas sin tener que sacrificar su bienestar. Por lo tanto, en esta etapa la Asequibilidad de energía es un indicador fundamental.

Por último, considerando el enfoque limpio con el que debe contar la ciudad, se propone que desde etapas tempranas se tenga un nivel de conciencia respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que desde cualquiera de las etapas se tendrán emisiones que pueden ser evitadas/mitigadas si se realiza una apropiada planeación, gestión, construcción y operación de estas. En consecuencia, el indicador de Emisiones de CO<sub>2</sub>-eq por consumo de energía debe ser monitoreado desde la primera etapa de una ciudad con suministro limpio, eficiente y confiable.

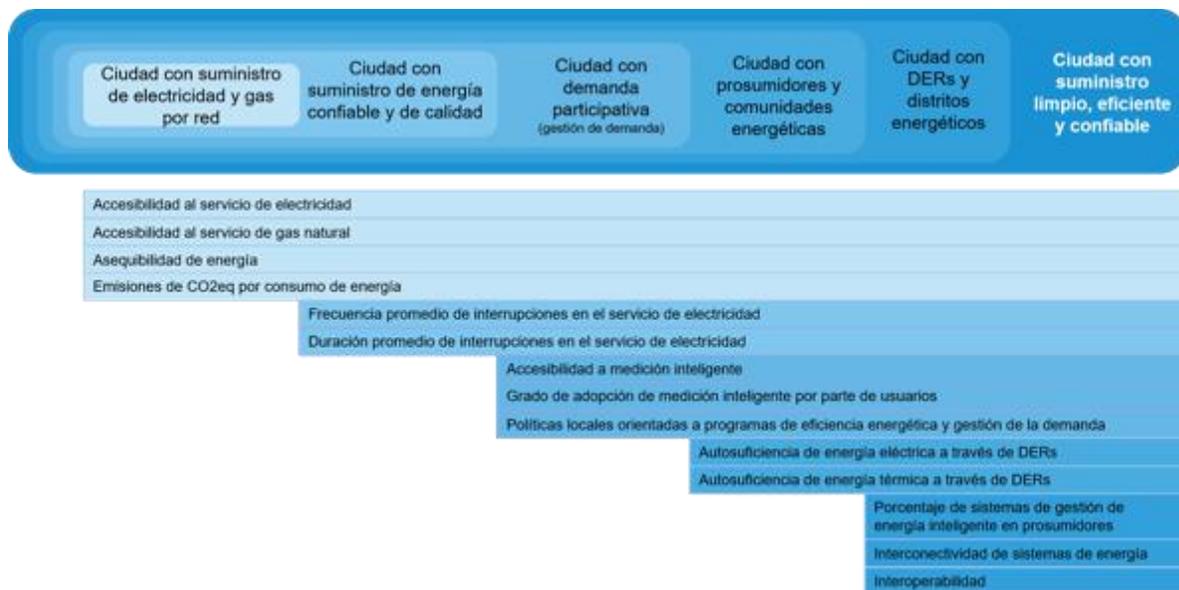


Figura 3. Propuesta de indicadores para una ciudad con suministro limpio, eficiente y confiable

- **Ciudad con suministro de energía confiable y de calidad**

La calidad de energía se puede entender desde el punto de vista de calidad de la potencia distribuida al usuario y la calidad del suministro del servicio. Considerando el contexto de esta propuesta, se restringe la evaluación de esta etapa al segundo punto de vista. Específicamente, se propone restringir el monitoreo de la calidad de energía al servicio de electricidad. La calidad del suministro del servicio de electricidad se monitorea a partir de las interrupciones del servicio que se presenten, específicamente se buscaría que la frecuencia y la duración de estas interrupciones sea lo mínimo posible. Por lo tanto, los indicadores que componen esta etapa son los indicadores estándar Frecuencia promedio de interrupciones en el servicio de electricidad y Duración promedio de interrupciones en el servicio de electricidad. A pesar de que no se considera la calidad de la potencia, el operador de red por regulación debe garantizar ciertos estándares de calidad en este sentido.

- **Ciudad con demanda participativa**

Uno de los objetivos principales de esta etapa es lograr incentivar el interés de los consumidores en sus patrones de consumo con el fin de que se logre una mayor participación de los consumidores como agentes activos del mercado eléctrico e incentivar la eficiencia energética. Uno de los instrumentos fundamentales para lograr este objetivo es la infraestructura de medición inteligente. Por lo tanto, es importante garantizar que los usuarios tengan acceso a este instrumento, por lo que se propone el indicador de Accesibilidad a medición inteligente para usuarios principalmente residenciales. Es importante destacar que uno de los retos importantes a los cuales se enfrenta el contexto colombiano es la financiación de medidores inteligentes para usuarios residenciales, dado que el operador de red percibe más beneficios con respecto al usuario.

Ahora bien, con el fin de evaluar si efectivamente la medición inteligente es efectiva como instrumento para promover la participación de la demanda, es necesario evaluar la percepción y adopción de esta tecnología por parte de los usuarios, y establecer si efectivamente hay un efecto en los patrones de comportamiento de la demanda. Para ello se propone el indicador de Grado de adopción de medición inteligente por parte de los usuarios.

Por último, se expuso anteriormente que esta etapa involucra estrategias orientadas a gestión de la demanda y eficiencia energética. Se considera que este tipo de estrategias deben ser promovidas desde los gobiernos de cada ciudad a través de políticas que permitan incentivar la implementación de estas estrategias. Por lo tanto, se propone el indicador Políticas locales orientadas a programas de eficiencia energética y gestión de la demanda.

- **Ciudad con prosumidores y comunidades energéticas**

Como se destacó anteriormente, el objetivo de esta etapa es el aprovechamiento de recursos energéticos naturales a través de la implementación de recursos de energía distribuidos por parte de prosumidores y comunidades energéticas. En este caso se considera que la métrica más apropiada es medir que tanto se están aprovechando estos recursos para suplir las necesidades energéticas de la ciudad; es decir, medir la autosuficiencia energética tanto eléctrica como térmico resultado de tener prosumidores y comunidades energéticas en la ciudad. Por lo tanto, se proponen los indicadores de Autosuficiencia de energía eléctrica a través de Micro-redes y los Recursos de Energía Distribuida (DERs) y Autosuficiencia de energía térmica a través de DERs.

- **Ciudad con DERs y distritos energéticos**

Una ciudad con DERs y distritos energéticos es aquella que logra integrar los diferentes sistemas de generación y almacenamiento de energía con los consumidores de energía con el fin de lograr una coordinación a nivel de ciudad de la gestión de la energía y la operación eficiente de los sistemas. Para ello, se consideraron los sistemas de gestión de energía como el instrumento que permitiría realizar la interconexión e interacción entre los diferentes agentes y recursos de tal manera que se logre una coordinación apropiada. Por lo tanto, se evalúa de los prosumidores y comunidades energéticas en qué proporción estos cuentan con un sistema de gestión de energía inteligente a través del indicador Porcentaje de sistemas de gestión de energía inteligente en prosumidores. Por otro lado, el nivel de interacción entre los sistemas de energía en la ciudad se pretende evaluar a través de la Interconectividad de sistemas de energía.

Una vez establecida la interconectividad de los sistemas de energía y sus respectivos sistemas de manejo de energía (EMS por sigla en inglés), el objetivo a evaluar para lograr una ciudad con suministro limpio, eficiente y confiable corresponde a la interoperabilidad de los sistemas de energía con otros servicios que ofrece la ciudad tales como el tratamiento de agua, transporte eléctrico, entre otros. La cualificación de este indicador puede basarse en las experiencias de interoperabilidad de Antalya [6], Dresde [7] y Valencia [8].

#### **4.4.4. Manejo integrado de residuos**

Se propone realizar el seguimiento del avance de la ciudad respecto a la gestión integral de los residuos sólidos a través de indicadores de resultado, como se muestra en la Figura 4. Es importante mencionar que estos indicadores dan cuenta del estado de avance de una ciudad en fase de operación. Los indicadores para evaluar las diferentes etapas del desarrollo de la ciudad son acumulativos, sin embargo, los estándares para su comparación se modifican de una etapa a otra, siendo cada vez más estrictos en la medida en que se avance hacia una ciudad con gestión integral de residuos sólidos.

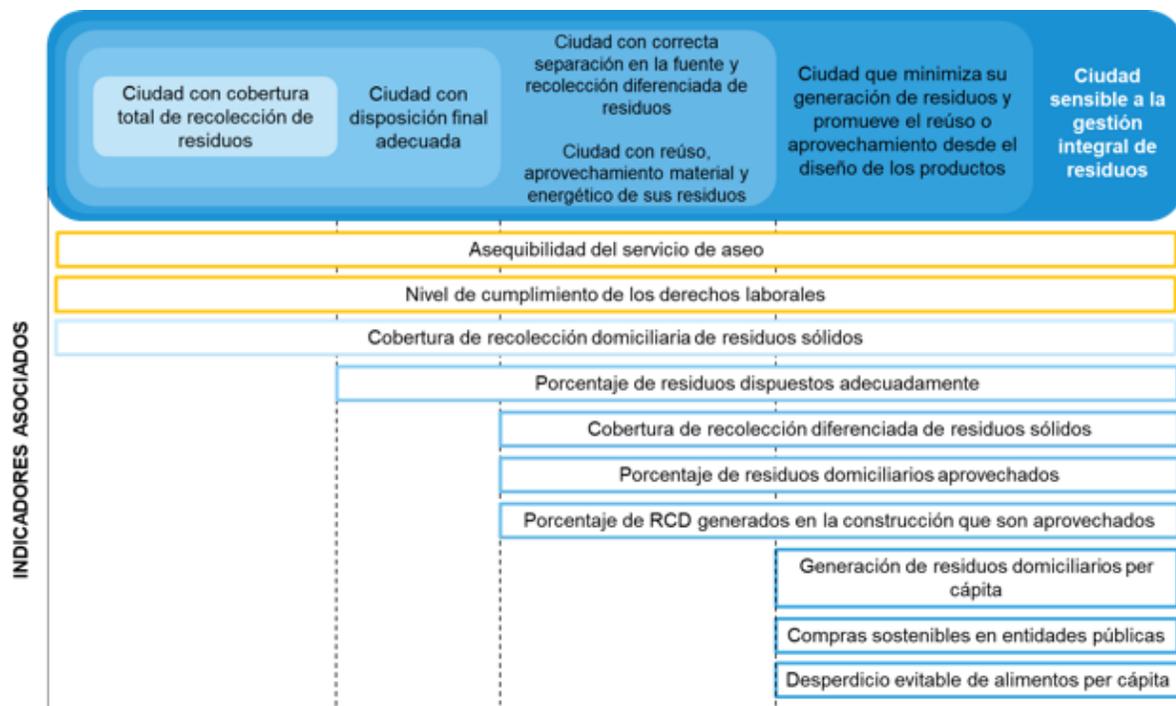


Figura 4. Indicadores de seguimiento Ciudad sensible a la gestión integral de residuos

Se establecieron dos indicadores de carácter social y económico que son transversales a todas las etapas de avance de la ciudad: la asequibilidad al servicio de aseo como medida de los recursos económicos que deben destinar los ciudadanos al pago de la gestión de sus residuos, y el nivel de cumplimiento de los derechos laborales de los trabajadores involucrados en todas las actividades de gestión de residuos. De acuerdo con la etapa de avance del desarrollo de la ciudad más actividades son tenidas en cuenta para cuantificar estos indicadores.

- **Ciudad con cobertura total de recolección de residuos**

En esta etapa se establece como indicador el porcentaje de cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos, que mide la cantidad de hogares de la ciudad que cuentan con este servicio. Si bien se espera que, en los desarrollos urbanos planificados, como los casos de estudio abordados en este proyecto, se garantice la cobertura del servicio de aseo, existen ciudades en las que la cobertura de la recolección aún no es total, por lo que se establece esta etapa como la actividad mínima requerida para permitir algún tipo de aprovechamiento o disposición final posterior.

- **Ciudad con disposición final adecuada**

Para esta etapa se considera también el indicador de cobertura de recolección de residuos, pero en este caso los estándares para su evaluación son más exigentes que en la primera etapa, es decir, para que una ciudad se clasifique como con disposición final adecuada, se requiere que la cobertura de recolección sea completa, de modo que la totalidad de los residuos generados en la ciudad puedan someterse a algún tipo de tratamiento o disposición final. El indicador incorporado en esta etapa es el porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente, considerando como sitios de disposición final adecuada los rellenos sanitarios, plantas integrales y celdas de contingencia [9]. En el caso de los rellenos sanitarios, estos deben contar con sistemas de recolección y tratamiento de lixiviados y quema de gas residual [10].

- **Ciudad con correcta separación en la fuente y recolección diferenciada de residuos - Ciudad con reúso, aprovechamiento material y energético de sus residuos**

Adicional a los indicadores considerados en las dos primeras etapas de desarrollo de la ciudad, en esta etapa se incorpora, en primer lugar, el indicador de cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos, contabilizando el porcentaje de hogares en la ciudad que cuentan con recolección separada de residuos domiciliarios aprovechables y no aprovechables. Teniendo en cuenta la importancia de la separación en la fuente y la recolección diferenciada de residuos en el potencial de aprovechamiento, en segundo lugar, se incluye el indicador de porcentaje de residuos domiciliarios aprovechados, cuantificando los residuos que se reutilizan o son objeto de aprovechamiento material, térmico o bioquímico sobre el total de los residuos domiciliarios generados potencialmente aprovechables. Relacionado con este indicador, en tercer lugar, se evalúa el indicador de porcentaje de residuos de construcción y demolición (RCD) generados en la construcción que son aprovechados, considerando el reúso y aprovechamiento material de otro de los flujos de residuos que se generan en las ciudades.

- **Ciudad que minimiza su generación de residuos y promueve el reúso o aprovechamiento desde el diseño de los productos**

En esta etapa se incluye como indicadores de seguimiento, además de los planteados para las primeras tres etapas, la generación de residuos per cápita, el desperdicio evitable de alimentos per cápita y las compras sostenibles en entidades públicas. La cuantificación de la generación de residuos y del desperdicio evitable de alimentos per cápita se emplean para evidenciar el avance respecto al propósito prioritario de la jerarquía de la gestión de residuos: la prevención. De igual forma, el indicador de compras sostenibles en entidades públicas mide la cantidad de entidades que incorporan dentro de sus políticas de compra criterios de sostenibilidad. Sin embargo, si la información disponible de la ciudad lo permite, sería más conveniente reportar el porcentaje de dinero invertido en compras sostenibles sobre el total de compras públicas realizadas. La implementación de políticas de sostenibilidad en las compras públicas permite que, a través de sus requerimientos a proveedores, se incentiven en la industria la generación de productos con menor impacto asociado desde su etapa de diseño.

- **Ciudad sensible a la gestión integral de residuos**

Una ciudad sensible a la gestión integral de residuos se evalúa respecto a todos los indicadores mencionados en las etapas anteriores y resulta tener un desempeño muy bueno en cada uno de ellos. En este sentido, una ciudad en esta etapa de desarrollo evita la generación de residuos desde el diseño de los productos que se consumen, maximiza el reúso y aprovechamiento material, térmico o bioquímico de los residuos generados que han sido separados en la fuente y recolectados de manera diferenciada. Asimismo, cuenta con sistemas de disposición final adecuada para los residuos no aprovechables y garantiza la cobertura total de la recolección de los residuos que genera.

#### **4.4.5. Movilidad sostenible (indicadores asociados a los objetivos de planificación de movilidad urbana sostenible)**

En la Figura 5 se presentan los indicadores para transporte y su asignación a cada uno de los objetivos de planificación de movilidad urbana sostenible presentados en el Capítulo 1. El enfoque de evaluación con las etapas e indicadores propuestos contempla un sistema de seguimiento y medición que va incorporando nuevos indicadores a medida que la movilidad en la microciudad va evolucionando. Es decir, que los indicadores por etapas son acumulativos.

La medición de los indicadores que pertenecen a cada etapa representada en la Figura 5, permite la evaluación de un componente de la movilidad sostenible para una ciudad. Es importante aclarar que este análisis es complementario con los demás componentes del estudio (ecología urbana, aguas, energía, residuos y edificaciones e infraestructura urbana) ya que se está proponiendo un marco de planificación sostenible, que represente cómo gradualmente se pueden ir incorporando nuevos objetivos, para pasar desde la visión convencional de planificación urbana hacia una más integral o sostenible.

- **Ciudad con acceso universal a los servicios que ofrece la ciudad**

El objetivo de esta etapa consiste en garantizar el acceso universal a los servicios que ofrece la ciudad: trabajo, transporte, educación, abastecimiento, recreación y cultura. Desde este punto de vista los indicadores que hacen parte de esta etapa no están enfocados en la movilidad per se, sino al acceso a estas oportunidades. En esta etapa se incluyen indicadores de accesibilidad a equipamientos, a los servicios de transporte y la asequibilidad al transporte.

La accesibilidad de la población a los servicios de la ciudad se mide a través de diferentes indicadores. Los indicadores de accesibilidad a equipamientos hacen referencia a la cercanía (o acceso geográfico) de la población a los servicios y se estima a través de la medición de longitudes en el sistema vial de la ciudad. También se mide a través del indicador de autocontención, que para este caso muestra que porcentaje de las oportunidades laborales se encuentran dentro de la misma microciudad. Estudios locales muestran el impacto diferenciado en cuanto al acceso que tienen diferentes grupos de población según su ingreso a las oportunidades de trabajo y estudio; las cuales se generan por las prácticas existentes en las ciudades sobre patrones de uso del suelo y los sistema de transporte [11]–[13].

Otro grupo de indicadores hace referencia al nivel de acceso que tiene la población a la ciudad a través del acceso a los servicios de transporte. El primer indicador de este grupo es la tasa de movilidad diaria per cápita, relevante en el contexto de población de bajos ingresos, en donde la posibilidad de desplazarse se puede ver limitada por los altos costos del transporte. A través del indicador de participación modal del transporte público se obtiene información sobre el alcance y cobertura de dichos sistemas en la población de interés, además de ser un indicador de sostenibilidad considerando los beneficios del transporte público en diferentes objetivos de calidad de vida y la sostenibilidad de las ciudades. Adicionalmente, el acceso a la ciudad y sus servicios se garantiza si el transporte para acceder a ellos tiene costos asequibles para la población.

- **Ciudad con planeación de visión cero**

Esta etapa considera la evaluación de dos externalidades negativas del transporte en el ámbito de la salud: la siniestralidad vial y los impactos en salud por la contaminación local. Ambas externalidades representan una prioridad en salud pública y por lo tanto en la gestión de una ciudad. En el caso particular de la siniestralidad vial, diferentes países han empezado a contemplar políticas de visión cero, cero muertes por incidentes de tránsito, esto partiendo de la premisa de que todas las muertes y lesiones graves por siniestros de tránsito son prevenibles. En este caso ampliamos el concepto para abarcar cero muertes por incidentes de tránsito y cero muertes por contaminación. Aunque la contaminación del aire tiene diferentes fuentes, el transporte es la principal causa de emisiones directas de PM<sub>2.5</sub> en las ciudades colombianas [14], [15], y éste es el principal contaminante dados sus impactos en la salud de la población [16].

Los impactos de la siniestralidad vial y de las muertes por contaminación, tienen implicaciones sociales profundas, en la salud y en la economía, por lo que su reducción se vuelve fundamental para cumplir con objetivos del desarrollo sostenible.

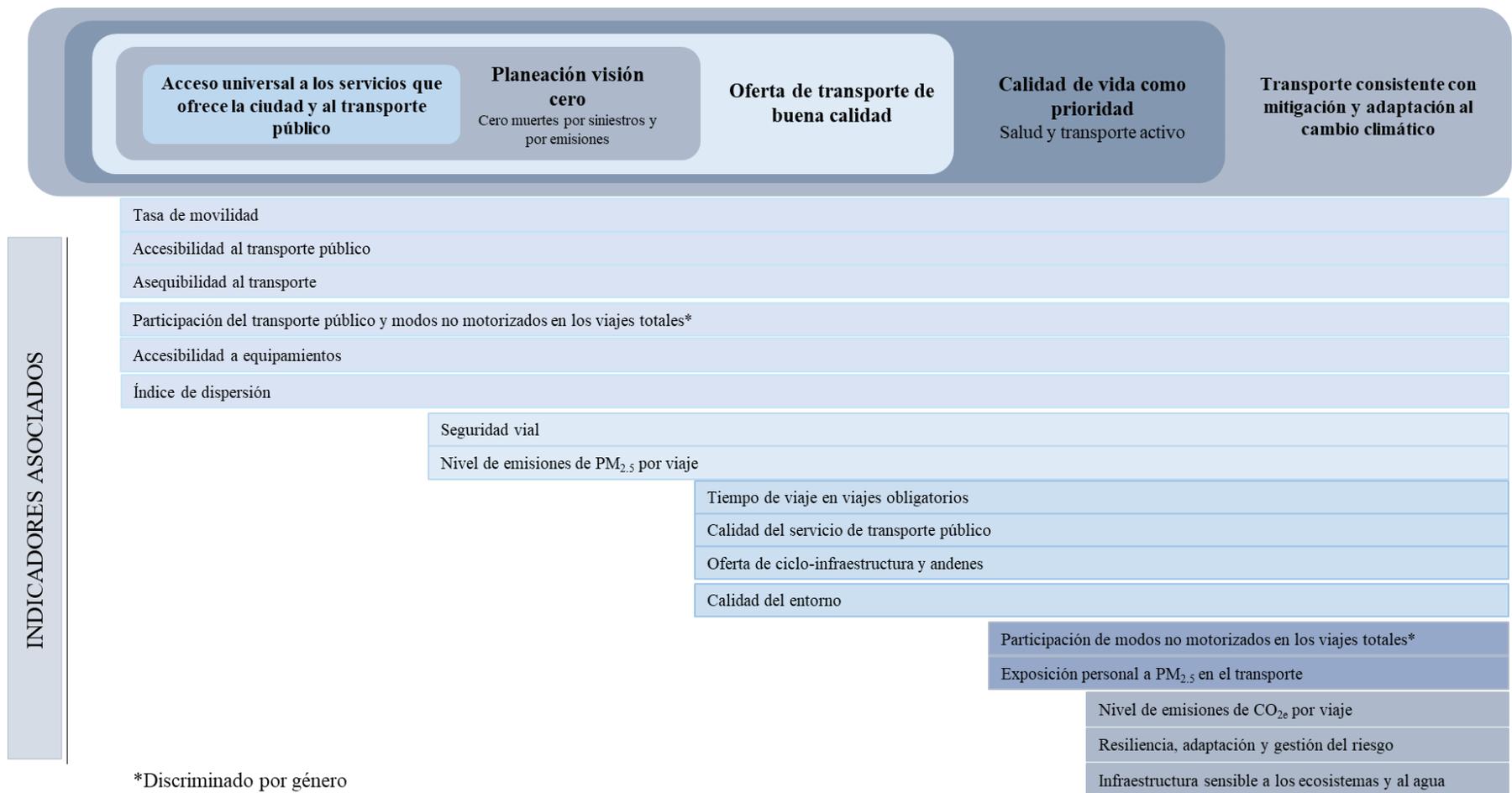


Figura 5. Indicadores asociados a los objetivos de planificación de movilidad urbana sostenible

- **Ciudad con oferta de transporte de buena calidad**

Con el objetivo de cambiar el paradigma de la movilidad, la cual se ha centrado en la evaluación y análisis de variables cuantitativas, en su mayoría de operación de los sistemas (p.ej., tiempos de recorrido, congestión en corredores, velocidad de operación), se propone considerar otras variables cualitativas, que no son tan frecuentemente evaluadas, como la satisfacción en el sistema de transporte, la calidad del entorno urbano o el nivel de la oferta de infraestructura para modos no motorizados. Tal y como lo sugiere Pikora [17], los barrios con infraestructura adecuada para el tránsito peatonal y el uso de modos activos de transporte alientan a la población a usar menos el transporte particular y motiva a usar otros modos de transporte como el transporte público, la bicicleta y la caminata [14], [18]–[20].

Un aspecto determinante en la calidad de vida son los tiempos de viaje de los viajes obligatorios, que, sumados a condiciones como inseguridad e incomodidad en los diferentes modos de transporte, tienen impactos relevantes en la salud de la población y en la productividad de las ciudades [21], [22]. Es por esto por lo que las ciudades encaminadas hacia una movilidad sostenible deben contemplar desde la fase de planeación estas características y seguirlas evaluando para implementar las mejoras que se requiera durante la fase de operación.

- **Ciudad con calidad de vida como prioridad**

Este objetivo se define en términos del impacto directo del transporte en la salud de los usuarios. Por un lado, se consideran los potenciales beneficios asociados al transporte activo (caminata y bicicleta) y por otro, los impactos relacionados con la exposición personal a la contaminación del aire de los usuarios del transporte en los diferentes microambientes relacionados con éste.

- **Ciudad con transporte consistente con mitigación y adaptación al cambio climático**

La etapa final contempla objetivos relacionados con la mitigación y adaptación del transporte en relación con el cambio climático. En Colombia la mayor contribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es generada por el sector transporte, el cual aporta un 37% del total de las emisiones del sector energía [2]. Esta cifra genera alerta teniendo en cuenta que para el año 2018 el parque automotor de vehículos livianos de pasajeros (incluyendo motocicletas) representaba el 82% del total del parque automotor vehicular del país (13.862.679), con un aumento de la flota de estas categorías del 46% en cinco años (2013 - 2018) [23]. En los escenarios futuros, el incremento en la carbono-intensidad del transporte de pasajeros está muy relacionada con una mayor participación de los modos privados (vehículos livianos y motocicletas), a expensas de una menor participación de sistemas más sostenibles como son el transporte público y los modos no motorizados [24].

En términos de adaptación al cambio climático, cada vez se reconocen más las sinergias entre la infraestructura de transporte y los ecosistemas urbanos; por ejemplo, en gestión de inundaciones en áreas urbanas, en reducción de efecto de isla de calor y en captura de carbono con infraestructura verde. Además de estos beneficios, tener en cuenta los servicios y funciones de los ecosistemas permitiría diseños de infraestructura de transporte con mayores beneficios netos para la sociedad [25].

#### **4.4.6. Edificaciones e infraestructura urbana**

Previamente se describió el marco conceptual a utilizar para evaluar el proceso de planeación hacia una ciudad con entornos construidos sostenibles. Para dar seguimiento a la evolución de este marco de referencia, la presente sección busca analizar los vínculos existentes entre dicho planteamiento escalonado y la serie de indicadores previamente definida para evaluar desarrollos urbanos. En el esquema de la Figura

6 se presenta el listado de indicadores y su vinculación a cada una de las fases evolutivas del marco conceptual utilizado.

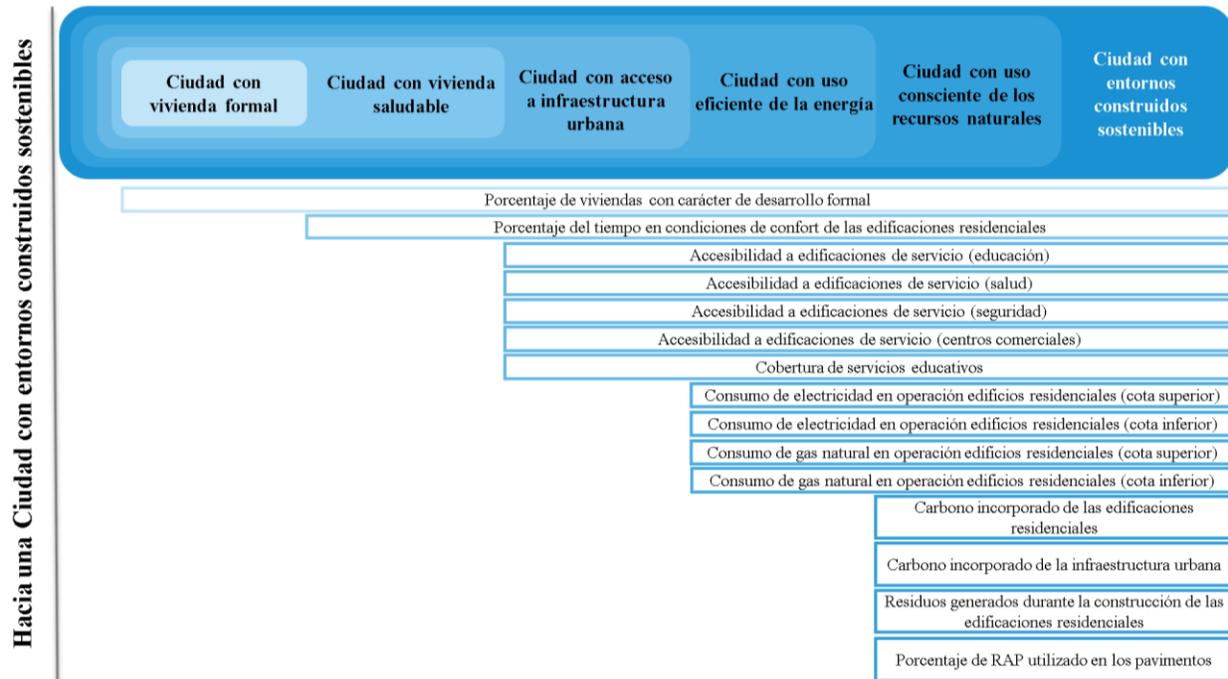


Figura 6. Indicadores asociados a cada etapa del proceso de planeación de ciudades

- **Ciudad con vivienda segura**

La importancia de esta etapa radica en el hecho de tener una influencia directa sobre las siguientes fases del modelo de ciudad. Este se debe a que, por ejemplo, cuando un desarrollador obtiene una licencia de urbanización, recibe el derecho de adecuar terrenos para una futura construcción, permitiendo así la creación de espacios privados y públicos, construcción de vías y redes de servicios públicos. Una responsabilidad similar ocurre cuando se aplica a una licencia de construcción, ya que el desarrollador se compromete a construir nuevas edificaciones de acuerdo con las normas del Plan de Ordenamiento Territorial [26].

Teniendo en cuenta que históricamente un sector importante de la población ha visto en los desarrollos informales una oportunidad para acceder a vivienda y, pensando en la evaluación de los aspectos de legalidad y seguridad descritos en secciones anteriores, se propone un indicador único que capture el atributo de formalidad de las viviendas. Este indicador, expresado como el porcentaje de viviendas formales dentro de un área urbana previamente seleccionada, contempla el cumplimiento a cabalidad de toda la documentación requerida por las curadurías urbanas. Entre la información solicitada se encuentran [27]: planos topográficos que indiquen las reservas, afectaciones y limitaciones urbanísticas; proyecto urbanístico total, certificación de disponibilidad de servicios públicos domiciliarios, estudios detallados de amenaza y fenómenos naturales, cálculos y diseños estructurales y geotécnicos, planos arquitectónicos, cesiones de área para espacio público, vial o de equipamientos; entre otros.

- **Ciudad con vivienda saludable**

En esta fase se plantea la medición de un indicador de confort térmico habitacional en edificaciones residenciales mediante el modelo adaptativo de temperatura desarrollado en el estándar ASHRAE 55-2017

[28]. El indicador definido se cuantifica mediante la obtención de la temperatura operativa al interior de las unidades de vivienda. Esta temperatura se puede estimar mediante medición directa en sitio o a través de herramientas computacionales de simulación térmica. Previo a la estimación y con el objetivo de realizar un análisis adecuado del indicador, es importante caracterizar las condiciones climáticas del área de estudio, así como de definir una escala de análisis y determinar una metodología de agrupación para resumir los resultados según condiciones del entorno construido.

- **Ciudad con acceso a infraestructura urbana**

Según la dimensión de ciudad de la cartilla de indicadores del Observatorio de Vivienda de la Universidad de los Andes, los servicios básicos a los que cualquier vivienda debería tener fácil acceso son: educación, salud, seguridad y comercio [29]. Para esta cuantificación se definió una serie de cinco indicadores, de los cuales cuatro cuantifican la accesibilidad a estos servicios básicos y el quinto evalúa la cobertura de los servicios educativos existentes, según la proporción de la demanda no suplida en el entorno urbano evaluado.

En el monitoreo de estos indicadores se debe considerar la importancia del contexto urbano analizado y la posible relevancia de algún otro servicio para estos casos. Adicionalmente, dado que a esta escala de análisis se presentan varios traslajos con otros sectores de evaluación, se podría incluir alguno de los indicadores de otros sectores que puedan evaluar las condiciones de acceso a infraestructura urbana, como los sistemas de transporte o el sistema de parques y espacio público.

- **Ciudad con uso eficiente de la energía**

En cuanto a la eficiencia energética, es bien sabido que los servicios de energía modernos son esenciales para el desarrollo de actividades productivas, cubrimiento de las necesidades básicas en el hogar, de salud y educación. Sin embargo, un alto consumo residencial, bien sea por electricidad o por gas natural, puede indicar una utilización no sostenible de la energía [30]. Lo anterior debido a deficiencias técnicas en la transmisión y el uso final, o en virtud de ciertos patrones de comportamiento de los ocupantes. De igual forma, un bajo consumo residencial responde generalmente a sacrificios de bienestar y comodidad por parte de los ocupantes, en aras de disminuir el pago por concepto de servicios públicos.

Con base en lo anterior, las demandas energéticas residenciales muy altas o muy bajas no son deseables en una ciudad sostenible. Por lo tanto, se buscó diseñar un indicador de cota superior y otro de cota inferior para cada fuente de energía. Como punto de partida, se consultaron rangos de consumo para la evaluación energética de una vivienda residencial en la literatura internacional y nacional. Una vez obtenidos estos rangos de referencia, se decidió realizar un análisis estadístico de la información de consumo de energía, capturada de la encuesta y los modelos definidos en el sector, se definieron unos rangos de consumo propios, con el objetivo de evaluar la eficiencia energética.

- **Ciudad con uso consciente de los recursos naturales**

Retomando la definición mencionada anteriormente, una ciudad que hace un uso consciente de los recursos naturales cuantifica impactos ambientales incorporados, utiliza eficientemente el material y reduce los desechos producidos. Con el fin de poder evaluar estos aspectos se establecieron cuatro indicadores.

Con respecto a la cuantificación del impacto ambiental, varios autores concuerdan en que la estimación, análisis y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>-equivalente son fundamentales. Se establecen dos indicadores: uno que cuantifica el carbono incorporado de las edificaciones y otro el de la infraestructura urbana. En cada uno de los indicadores se define un alcance y una metodología que se adapta de diferentes fuentes bibliográficas [31], [32]. El carbono incorporado se considera como un subconjunto dentro la metodología

LCA (UP) y se expresa en CO<sub>2</sub>-equivalente [33]. El segundo de los indicadores mencionados no incluye la infraestructura de transporte y se recomienda que este componente se agregue en futuras investigaciones. Adicionalmente, los indicadores están sujetos a mejoras en términos de su adaptación al contexto nacional (alcance y marcos de referencia).

Con respecto a la eficiencia de material y reducción de desechos producidos se determinaron dos indicadores. El primero corresponde a cuantificar los residuos generados en la construcción de edificaciones residenciales y el segundo plasma el porcentaje de pavimento asfáltico reciclado (RAP) utilizado en el pavimento. El primer indicador hace énfasis respecto al uso eficiente del material durante la construcción y no tiene en cuenta su eventual tratamiento. Este último parámetro es considerado por otro indicador formulado por el grupo de residuos. El segundo indicador se centra en uno de los componentes de la infraestructura urbana: las vías. Este indicador busca evaluar el uso de una de las tecnologías ampliamente utilizadas y aprobadas en el mundo que ofrece beneficios ambientales: el pavimento asfáltico reciclado (RAP) [34], [35]. Esta tecnología puede ser utilizada en diferentes capas del pavimento ya que se utiliza tanto para la mezcla asfáltica, como para las capas de base y subbase [35]. La utilización del RAP reemplaza el uso de material virgen lo cual genera importantes reducciones en diferentes GEI [34].

- **Ciudad con entornos construidos sostenibles**

En este componente, para los indicadores planteados por el sector edificador, se redefinen los marcos de referencia – *benchmarks* – desde una perspectiva más ambiciosa o exigente. De esta manera, los conceptos previamente mencionados de eficiencia energética, confort habitacional, generación y cuantificación de emisiones y optimización de recursos pasan a exigir mejores prácticas para poder alcanzar los estándares definidos. Lo anterior, partiendo de la premisa de que muchos de estos indicadores se evalúan como “buenos” en la visión de ciudad con uso consciente de los recursos naturales. Por otra parte, para lograr consolidar una ciudad con entornos construidos sostenibles se debe incluir una visión más integral del ambiente construido mediante la inclusión de indicadores presentados por los otros grupos del presente estudio. Esto con el objetivo de evaluar componentes relacionados con la gestión del suelo, manejo de RCD, la gestión de la naturalidad y los servicios ecosistémicos, y la gestión de la oferta y demanda de energía.

## Referencias

- [1] IPCC, “Summary for urban policy makers,” 2018.
- [2] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería, “Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC,” Bogotá D.C., Colombia, 2018.
- [3] World Resource Institute (WRI). C40 Cities Climate Leadership Group, Local Governments for Sustainability (ICLEI), “Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories: An Accounting and Reporting Standard for Cities,” *World Resour. Institute.*, pp. 1–176, 2014.
- [4] IPCC, “Metodologías Genéricas Aplicables a Múltiples,” *Directrices del IPCC 2006 para los Inventar. Nac. Gases Ef. Invernadero Vol. 4 Agric. Silvíc. y Otros Usos la Tierra.*, pp. 1–66, 2006.
- [5] A. Y. Hoekstra, J. Buurman, and K. C. H. Van Ginkel, “Urban water security: A review,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 13, p. 53002, 2018.
- [6] MatchUP, “Urban platform Integration and Interoperability in Antalya,” 2020.
- [7] MatchUP, “Urban platform Integration and Interoperability in Dresden,” 2020.
- [8] MatchUP, “Urban platform Integration and Interoperability in Valencia,” vol. 2018, no. 774477, 2020.
- [9] Naciones Unidas, “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe.” Santiago, 2018.
- [10] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Disposición Final de Residuos Sólidos - Informe Nacional 2015,” 2016.
- [11] J. P. Bocarejo S. and D. R. Oviedo H., “Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 24, pp. 142–154, 2012.
- [12] L. A. Guzman, D. Oviedo, and C. Rivera, “Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 58, pp. 236–246, 2017.
- [13] D. Oviedo Hernandez and H. Titheridge, “Mobilities of the periphery: Informality, access and social exclusion in the urban fringe in Colombia,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 55, pp. 152–164, 2016.
- [14] DNP, “Conpes 3943 - Política para el mejoramiento de la calidad del aire,” Bogotá D.C., Colombia, 2018.
- [15] IDEAM, “Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2017,” Bogotá D.C., Colombia, 2018.
- [16] DNP, “Colombian National Planning Department (NPD) - Costs of environmental degradation (in Spanish),” 2017. .
- [17] T. Pikora, B. Giles-Corti, F. Bull, K. Jamrozik, and R. Donovan, “Developing a framework for assessment of the environmental determinants of walking and cycling,” *Soc. Sci. Med.*, vol. 56, no. 8, pp. 1693–1703, Apr. 2003.
- [18] P. K. Baran, D. A. Rodríguez, and A. J. Khattak, “Space Syntax and Walking in a New Urbanist and Suburban Neighbourhoods,” *J. Urban Des.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–28, Feb. 2008.

- [19] R. Cervero, O. L. Sarmiento, E. Jacoby, L. F. Gomez, and A. Neiman, “Influences of built environments on walking and cycling: Lessons from Bogotá??,” *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 3, no. 4, pp. 203–226, 2009.
- [20] R. Cervero and M. Duncan, “Walking, Bicycling, and Urban Landscapes: Evidence from the San Francisco Bay Area,” *Am. J. Public Health*, vol. 93, no. 9, pp. 1478–1483, 2003.
- [21] X. Wang, D. Rodríguez, O. L. Sarmiento, and O. Guaje, “Commute patterns and depression: Evidence from eleven Latin American cities,” *J. Transp. Heal.*, vol. 14, no. 100607, 2019.
- [22] D. Pojani and D. Stead, *The Urban Transport Crisis in Emerging Economies*. 2017.
- [23] Ministerio de Transporte, “Transporte en Cifras 2013-2018.” Bogotá D.C., Colombia, 2019.
- [24] M. Espinosa, Á. I. Cadena, and E. Behrentz, “Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector,” *Energy Policy*, vol. 124, pp. 111–122, Jan. 2019.
- [25] L. M. Jones-Walters and K. Čivić, “Implementing green infrastructure and ecological networks in Europe: Lessons learned and future perspectives,” *J. Green Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 307–324, 2014.
- [26] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial Desarrollo Sostenible, “Licenciamiento Urbanístico, Reconocimiento de Edificaciones y Legalización de Asentamientos Humanos - Guía Metodológica 2,” *D. Of. No. 43.091*, vol. 1997, no. Julio 18, pp. 1–99, 1997.
- [27] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Documentos para Licencia de Urbanismo y Construcción.” .
- [28] ASHRAE, *Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA: ANSI, 2017.
- [29] Observatorio de Vivienda, “Cartilla de indicadores: Ciudad,” Universidad de los Andes, 2019.
- [30] I. Losada Rodríguez *et al.*, “Guía Metodológica Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles,” 2011.
- [31] BSI Standards Publication, “BS EN 15978:2011.” Londres, 2012.
- [32] N. C. Kayaçetin and A. M. Tanyer, “Embodied carbon assessment of residential housing at urban scale,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 117, p. 109470, Jan. 2020.
- [33] Thinkstep ANZ, “Under Construction: Hidden emissions and untapped potential of buildings for New Zealand’s 2050 zero carbon goal.” 2019.
- [34] M. Guo *et al.*, “Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 266, p. 121704, Sep. 2020.
- [35] National Asphalt Pavement Association, “Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage.” 2017.