Contenido

3. Capítulo 3. Los modelos para la evaluación de acciones de mitigación, adaptación y mejora 2
3.1. Los modelos como apoyo al análisis de acciones 2
3.2. Modelos sectoriales empleados 6
3.2.1. Modelo Sector Ecología Urbana 7
3.2.2. Modelo Sector Manejo Integrado del Agua 9
3.2.3. Modelo Sector Energía 17
3.2.4. Modelo Sector Residuos 22
3.2.5. Modelo Sector Transporte 26
3.2.6. Modelo Sector Edificaciones 29
3.3. Herramienta de integración para las opciones de mitigación 30
Referencias 34

3. Capítulo 3. Los modelos para la evaluación de acciones de mitigación, adaptación y mejora

3.1. Los modelos como apoyo al análisis de acciones

El propósito de los modelos es explicar o predecir algún fenómeno del "mundo real". Estos modelos pueden ser tan simples o complejos como el diseñador lo plantee. Sin embargo, si bien nunca podrán abarcar todas las variables e incertidumbres que están atadas al proceso, son bastante útiles sobre todo si el proceso que se está modelando es complejo y de gran escala. En general, en los modelos asociados al diseño de ciudades, los investigadores se han centrado en analizar cada uno de los sectores independientemente. De esta manera, es más sencillo entender el comportamiento individual de cada sector, debido a la experticia que se tiene de él. Sin embargo, el análisis independiente de cada uno de los sectores limita las posibilidades de optimizar la operación.

En la literatura se tienen algunas aproximaciones en las que se trata de abarcar una noción sistémica del problema. Por ejemplo, en el trabajo de Masson et al. [1] los autores proponen una metodología para un modelamiento sistémico que pueda dar luces sobre las interacciones entre cambio climático, estructuras de ciudad y economías urbanas. El trabajo se enmarca en tres proyectos coordinados (VUCRA, MUSCADE, ACCLIMAT) e incluye tres aspectos relevantes: i) la adaptación a cambios climáticos extremos; ii) la mitigación de cambio climático al reducir el consumo energético; y iii) el impacto en los escenarios de adaptación en el confort humano e indicadores de cambio climático para áreas urbanas. Los autores muestran que, en la literatura, la mayoría de los trabajos no se basan en aproximaciones sistémicas/interdisciplinarias que tengan en cuenta la parte social, económica y física que interactúan a nivel de ciudad. La gran mayoría de trabajos se centra en uno o en un subconjunto pequeño de áreas científicas. A su vez, en sus aproximaciones frente al cambio climático no se permite un cambio en la forma o en la función de la ciudad. En otras palabras, las evoluciones dinámicas no se tienen en cuenta en la gran mayoría de los trabajos. De paso, las estrategias de adaptación que se han propuesto se basan más en los beneficios ambientales que en las consecuencias socio económicas y sus costos, los cuales pueden ser peores. La complejidad de las interacciones en una ciudad lleva a plantear varios retos: i) el sólo hecho de estudiar una parte, requiere una aproximación interdisciplinaria, ya que muchos procesos entran en juego; ii) una herramienta fundamental es el modelamiento numérico. Con ello se tiene un entendimiento global de la ciudad, la cual opera en diferentes escalas temporales y espaciales; y iii) la aproximación sistémica ayuda a unir modelos diseñados para diferentes propósitos.

Bajo este orden de ideas, existe otro paradigma de modelamiento para ecosistemas, el cual facilita la presentación de los indicadores necesarios para poder tomar decisiones a nivel político [2]. El marco denominado DPSIR (*driving foces, pressures, states, impacts and responses*) propone una cadena de enlaces causales que empieza por las "*driving forces*" (e.g., sectores económicos, actividades humanas y sociales), las cuales generan unas "*pressures*" (e.g., emisiones, desperdicios) que modifican los "*states*" (e.g., físicos, químicos, biológicos), generando unos "*impacts*" en los ecosistemas y la salud. Todos estos elementos llevan a las "*responses*" que son de índole político y social. Dentro de estas respuestas están un conjunto de indicadores que priorizarán los objetivos de la sociedad. El paradigma DPSIR ha sido bastante utilizado en el sector de aguas y ecología urbana [3] [4] [5], pero posee un problema y es la dificultad que plantea modelar cada una de las posibles problemáticas que emergen en este contexto. Por cada problema que se plantee, uno debería plantear una estructura causal como la que se ve en la

Figura 1. Sin embargo, la ventaja de este tipo de modelamiento radica en cómo los indicadores que se planteen pueden generar políticas para mejorar los elementos planteados en los bloques DPSI.

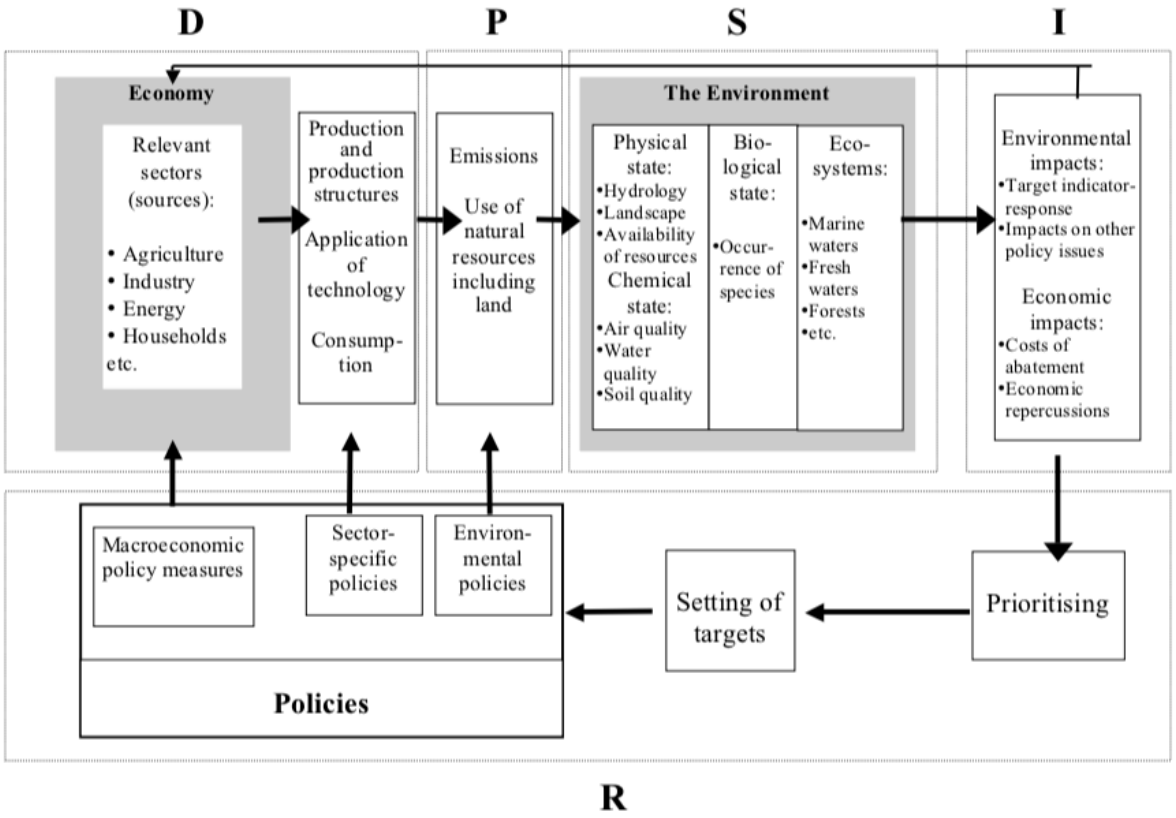


Figura 1. Paradigma DPSIR. Esta figura fue desarrollada por NERI, y fue tomada de [2]

Por otro lado, existe cada día una mayor interacción entre diferentes sectores, lo cuales están distribuidos y cuya información se transmite por medio de redes de información para su monitoreo y operación. Para poder interactuar de manera óptima entre los sectores, se necesita que existan sinergias no sólo en la parte técnica sino en otras dimensiones como la ecología urbana. Para ello, se necesitan modelos que sean capaces de proveer análisis, diseño y control óptimo de las interacciones que existan entre sectores, los cuales tengan en cuenta su ubicación geográfica y la incertidumbre de los parámetros. En este caso, los paradigmas de integración de sistemas energéticos y nexo de recursos han sido los que más se han venido desarrollando.

El concepto de interconectar diferentes dominios energéticos se conoce como integración de sistemas energéticos (ESI, por sus siglas en inglés), concepto que ha sido desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) [6]. Sin embargo, varios autores le han dado otros nombres a esta idea, dentro de los que se encuentran, *integrated energy systems, multi-energy systems* (MES), *energy internet*, entre otros [7]. La integración de sistemas energéticos es el proceso de coordinar la operación y planeación de sistemas energéticos de múltiples escalas geográficas para entregar/proveer un servicio confiable y costo efectivo minimizando el impacto al medio ambiente. El hecho de integrar dominios energéticos: i) añade flexibilidad al sistema eléctrico; y ii) permite la interacción de diferentes vectores energéticos (e.g., electricidad, gas, térmico) con otras infraestructuras de gran escala (e.g., movilidad, agua, TICs). El valor del concepto de ESI está en coordinar cómo los sistemas de energía producen y entregan energía en todas

las formas para lograr diferentes objetivos de manera confiable, económica y con un bajo impacto del medioambiente. Algunos beneficios de ESI son: i) la integración de altos niveles de recursos renovables; ii) un incremento en la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de potencia; y iii) ahorros significativos en la operación de varios sistemas de manera simultánea (e.g., agua, gas, calefacción/refrigeración). Todo esto debido a la flexibilización que produce el hecho de integrar múltiples sistemas energéticos en múltiples escalas espacio/temporales.

Al ser una idea desarrollada más desde el punto de vista de energía eléctrica, el concepto de ESI aún no permea tanto entre diferentes áreas. Sin embargo, ideas similares se han desarrollado en otros campos. Acá es donde podemos encontrar que existe una relación directa entre el concepto de ESI y el que en la literatura se denomina *resource nexus*. La popularidad de este concepto se remonta al año 2008 en el World Economic Forum, en el que los retos globales en términos de crecimiento económico desde el punto de vista del nexo energía-agua fueron identificados [8] [9]. Desde la conferencia de Bonn del año 2011 [10], cerca de 300 organizaciones lanzaron iniciativas alrededor de los nexos que existen en diferentes áreas (e.g., energía-alimentos-agricultura-agua-tierra), y la mayoría de los trabajos científicos se han concentrado en resolver problemas globales, pero con muy poco énfasis en lo urbano y lo rural.

El tema del nexo entre agua y energía se remonta al año 2007 cuando Mukherji definió por primera vez el concepto de "*energy-irrigation nexus*". En este trabajo se estudia el impacto de mercados de agua subterránea en la India [11]. El nexo entre energía-agua se puede expresar como la correlación entre agua y energía, ya que están acoplados en su producción, suministro, disposición, transmisión y uso. Este nexo se puede expresar como un método de análisis para expresar las relaciones que existen entre diferentes recursos, y algunos investigadores estudian casos de estudio en diferentes escalas dependiendo el tamaño. Algunos parten de la escala urbana, otros hablan a nivel de un conjunto más amplio en lo urbano, para luego tener otros investigadores que se concentran en problemáticas nacionales e incluso globales.

Por otra parte, algunos trabajos buscan desarrollar modelos y herramientas para entender y cuantificar las relaciones que existen entre los sectores. Los modelos más comunes que se han estudiado son:

- Evaluación del ciclo de vida.
- Análisis entrada/salida.
- Métodos de cómputo de equilibrios generales.
- Aproximaciones basadas en optimización.

Dentro de los trabajos más relevantes que se encuentran está el trabajo de Bazilian [12], el cual propone un método cualitativo del nexo agua-energía-alimentos. A su vez, los autores proponen un modelo que pueda soportar el país en vía de desarrollo en términos de política y mecanismos de diseño. Otros dos trabajos relevantes en esta área son los de Siddiqi [13] y el de Scott [14]. En el primer trabajo, los autores encuentran que la interdependencia entre sistemas de energía y agua no es igual. Los sistemas de energía no tienen tanta dependencia del agua, como sí la pueden tener el desarrollo y producción de recursos hídricos con respecto a la energía. Mientras tanto, en el segundo, los autores muestran que, en el transporte de carbón y gas, la energía juega un papel más importante a nivel regional que el agua. Actualmente, la mayoría de los trabajos se enfoca en incluir la parte de la cadena alimenticia como parte del nexo y entender sus interacciones.

En general, los esfuerzos en el dominio del nexo FEW (*food-energy-water*) se han concentrado en tres aspectos [15]: i) entender e interpretar el concepto; ii) desarrollar modelos que identifiquen tradeoffs y

sinergias entre sistemas FEW, entender los impactos socio-ambientales y liderar el desarrollo de políticas entre sectores; y iii) desarrollar investigación empírica que muestre las fuerzas que dominan los sistemas FEW y prueben colaboraciones entre diferentes *stakeholders*. En este caso [15] clasifican los métodos y herramientas en 3 categorías:

- Cuantificación de la huella ambiental de recursos
    - Los métodos de cuantificación de la huella ambiental son bastante utilizados para cuantificar el recurso y la eficiencia económica asociada con FEW.
    - LCA (*life-cycle assessment*): método típico para cuantificar los impactos ambientales de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, puesto desde la perspectiva de la huella de carbono. Este método es *bottom-up*. Existe otro *top-down* que es IOA (*input-output analysis*).

- Evaluación y simulación sistémica
    - Desde el punto de vista sistémico, tres métodos y herramientas han sido utilizados:

        - Sistemas de indicadores (IS): para facilitar la evaluación se tienen herramientas de valoración como:
            - Nexus assessment 1.0
            - WEF nexus tool 2.0
            - Pardee RAND 'FEW Index'

          Algunas de estas brindan herramientas online para científicos y políticos buscando generar estrategias.

        - Modelos de sistemas dinámicos (SD): permite un análisis comprensivo a nivel multi-sectorial a niveles macro y micro. En estos, se establecen lazos de retroalimentación causales entre los elementos de ciertos sistemas [16]. Puede tener también en cuenta las reglas y las relaciones entre los componentes de un FEW y el sector externo [17] [18] [19].

        - Network analysis (NA): capaz de modelar flujos directos e indirectos encarnados en las cadenas entrelazadas de producción y consumo, indicando el potencial de investigar los *trade-offs* entre múltiples elementos. El trabajo [20] muestra la coexistencia y competencia entre varios elementos (agua-energía) en un estudio del nexo.

    - Método de manejo óptimo.

Dentro de los trabajos asociados con la idea de *network analysis* (NA), se encuentra el de Fath [21], el cual reintroduce la visión holística de lo que se denomina *flow environment control parameter*. Esta expresión se podría reducir simplemente a *net flow analysis (utility analysis)*. A su vez, el autor pretende extender la metodología al análisis de *storage network*. Sin embargo, el NA se aplica a sistemas en estado estacionario. Por lo tanto, se está viendo únicamente una foto de lo que sucede en un instante determinado del comportamiento del sistema. En ese instante se puede observar la influencia que tiene cada componente sobre otro dependiendo de la configuración.

Una de las formas en las que podrían modelarse de manera dinámica este tipo de sistemas en los cuales exista un nexo entre diferentes sectores es el de los sistemas compartimentales. Los sistemas compartimentales modelan procesos dinámicos caracterizados por las leyes de conservación (e.g., masa, fluidos, energía) y por el flujo de material entre unidades denominadas compartimentos. Ejemplos de sistemas compartimentales son las redes de transporte, las redes de comunicaciones, los modelos de propagación de epidemias, así como las redes ecológicas y biológicas. Estos sistemas compartimentales son un caso particular de los denominados *positive systems* (i.e., sistemas dinámicos con variables de estado que son no negativas para todo tiempo). En los sistemas compartimentales el material se almacena en lugares específicos y se transfiere a lo largo de aristas (*edges*) de un grafo dirigido, denominado dígrafo compartimental. Otra forma de denotar los sistemas compartimentales en la literatura es por medio de la expresión *dynamical flow networks*. Los nodos de almacenamiento se conocen como compartimentos [22].

3.2. Modelos sectoriales empleados

Una de las propuestas, es tomar el diagrama que se ve en la Figura 2. En este caso, en cada uno de los sectores, se tendrán diferentes compartimentos que modelarán la interacción que existe entre los elementos asociados en dicho sector, distinguiendo claramente los flujos de entrada, salida e internos. Los flujos de entrada y salida son aquellos que estarán afectados o afectarán otros sectores, logrando modelar la interacción general de todos los sectores.

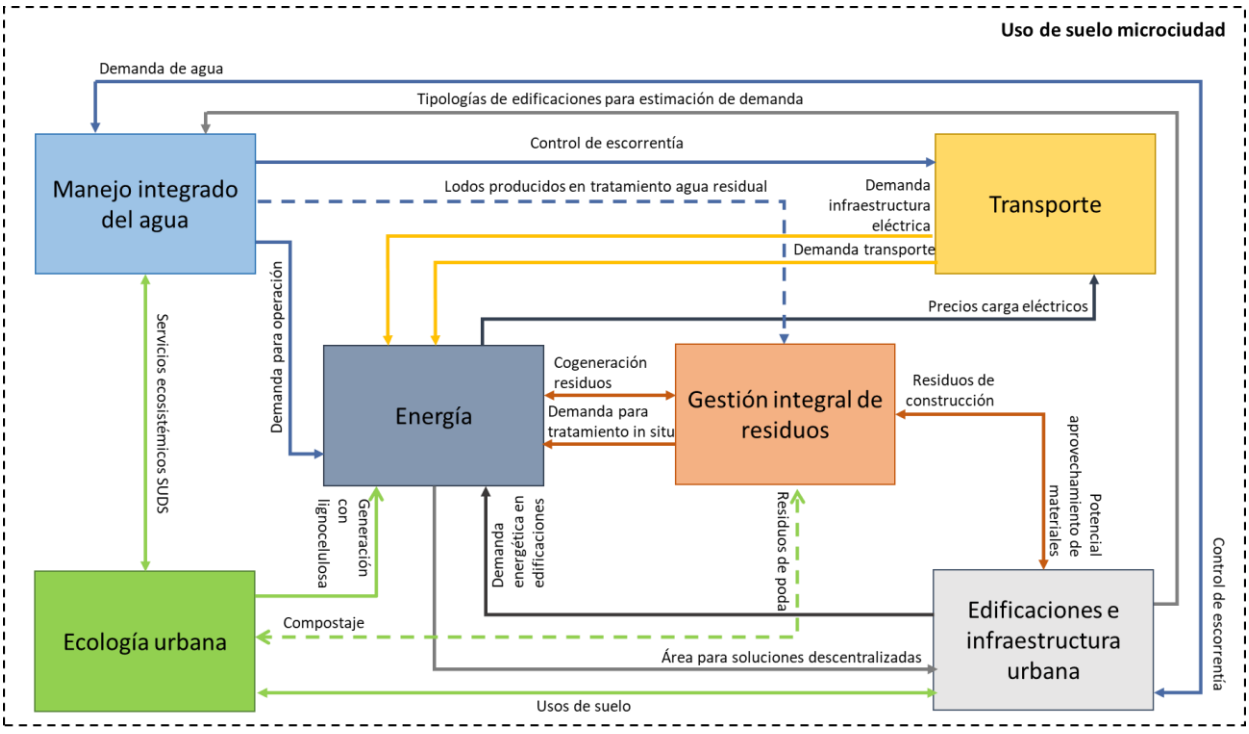


Figura 2. Esquema general de la interconexión de los diferentes sectores.

Por lo pronto, cada uno de los sectores realizó un modelado individual de sus interacciones, tratando de identificar sus entradas, salidas y posibles comportamientos dinámicos. A continuación, por cada uno de los sectores se presentarán las entradas, salidas y las aproximaciones metodológicas con las que se representaron en cada uno de los modelos sectoriales.

3.2.1. Modelo Sector Ecología Urbana

La evaluación de indicadores de línea base del sector de ecología urbana (Ver Figura 3) aborda la cantidad, disponibilidad, accesibilidad, calidad en términos de funcionalidad socioecológica y los servicios ecosistémicos de Regulación del clima (local) y captura de CO_2 de los espacios verdes urbanos. La medición de los relacionados con disponibilidad, accesibilidad y funcionalidad, se realiza con base en información de uso y cobertura del suelo y población, por medio de geoprocesamientos relativamente sencillos, como estadísticas espaciales y buffers con Sistemas de Información Geográfica (SIG) como QGIS (software libre) y ArcGIS.

Para la cuantificación biofísica de los indicadores relativos a servicios ecosistémicos, además de la información de cobertura y uso del suelo, se requieren como entradas imágenes satelitales multiespectrales que son procesadas por medio de diferentes herramientas de ArcGIS como álgebra de mapas para estimar el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) y LST (Land Surface Tempertature) con el fin de analizar la temperatura superficial con relación a las coberturas.
Adicionalmente, valores unitarios de referencia de captura de CO_2 por individuo arbóreo o área de coberturas de copas del IPCC [23]. Cabe anotar que estos valores se pueden obtener también de mediciones propias en campo, por ejemplo, por medio de establecimiento de parcelas y de ecuaciones alométricas en los casos en que las condiciones de tiempo y disponibilidad así lo permitan. También existen para ello modelos como InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) [24] desarrollado en el marco del denominado Natural Capital Project, liderado por la Universidad de Stanford, que permiten de igual manera integrar el valor de la naturaleza en la toma de decisiones, por medio de modelos espaciales tanto biofísicos como económicos, con requerimientos de información relativamente bajos. Los resultados obtenidos se integran con los demás indicadores. El indicador del servicio ecosistémico de almacenamiento y captura de CO_2, se integra en el modelo de emisiones.

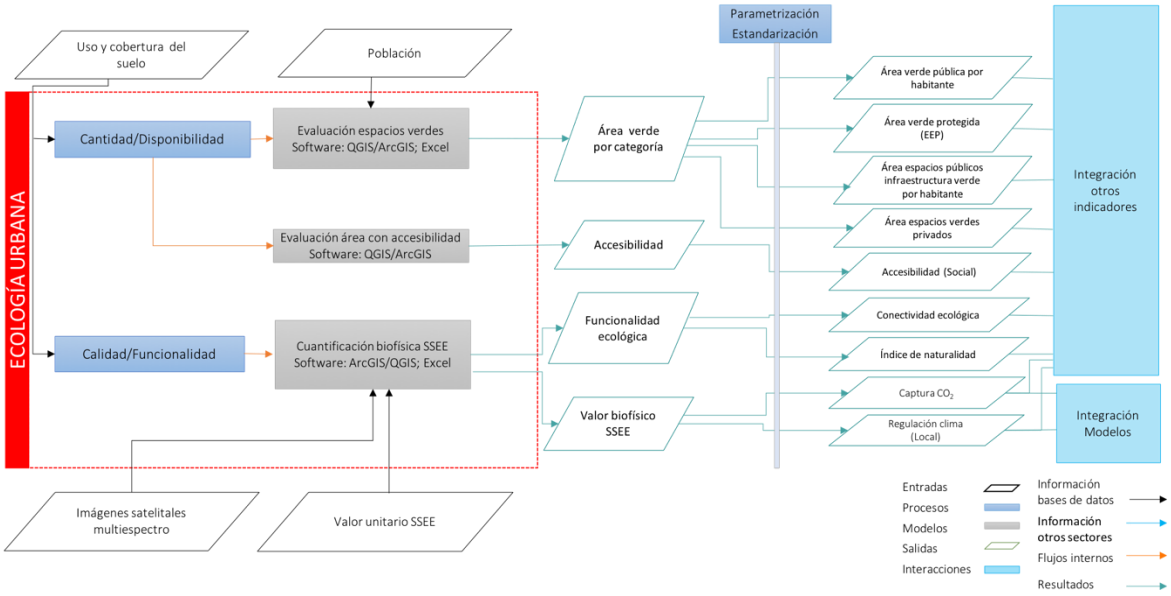


Figura 3. Diagrama de cajas escenarios de línea base - sector Ecología Urbana

Para la evaluación de los escenarios con intervenciones (Ver Figura 4), se tienen como entradas las diferentes interacciones entre los sectores, relacionadas con el uso y cobertura del suelo, y las

preferencias/restricciones especialmente identificadas como resultado de la encuesta realizada en Ciudad Verde. Como medidas de mejora, se plantea la estrategia de restauración y consolidación de la infraestructura verde y la estructura ecológica principal, que se aborda en detalle en el capítulo de opciones de mitigación y mejora de este informe y, para su análisis, se incluye el aumento de la cobertura arbórea y se incluyen además los costos de su implementación. Cabe mencionar que los servicios ecosistémicos hídricos, no hacen parte del componente de ecología urbana ya que estos hacen parte del ámbito de análisis del sector de Manejo Integrado del Agua.

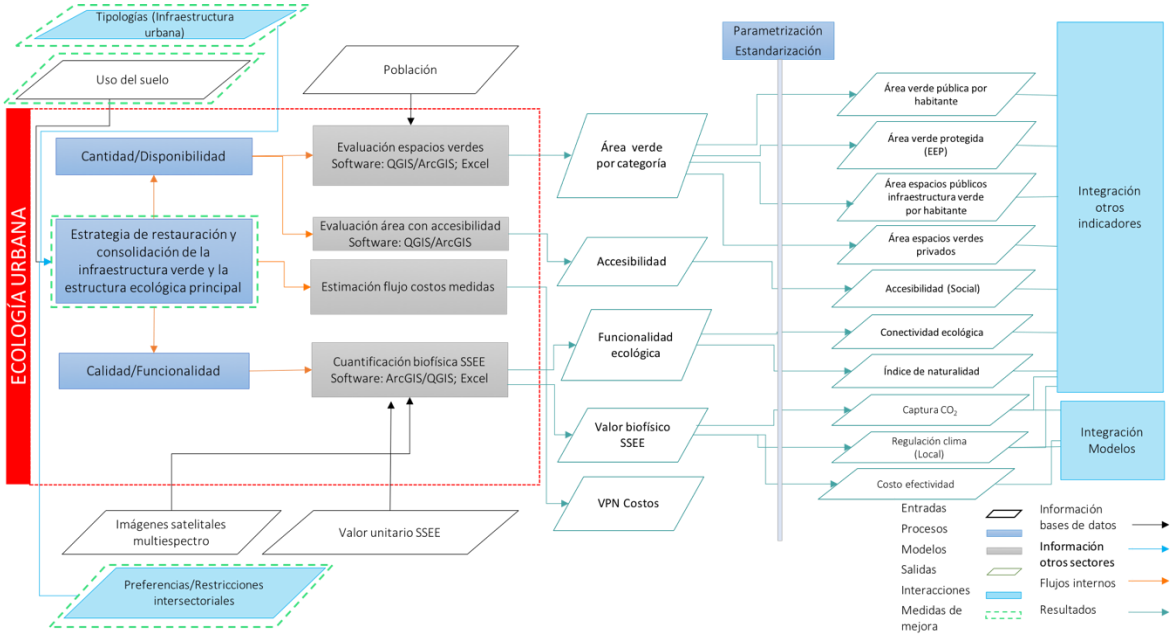


Figura 4. Diagrama de cajas escenarios con intervenciones - sector Ecología Urbana

- Descripción de los modelos

Para la evaluación de los indicadores del sector, existen diferentes alternativas, las cuales se pueden seleccionar de acuerdo con la información disponible, capacidad técnica y disponibilidad de software. En tal sentido, para los casos de estudio se emplean principalmente Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS) y cálculos sencillos en Microsoft Excel, dado que no se requieren necesariamente modelos específicos. Sin embargo, para la estimación por ejemplo de la captura de CO_2, se pueden también utilizar modelos como InVEST (Ver Figura 5).

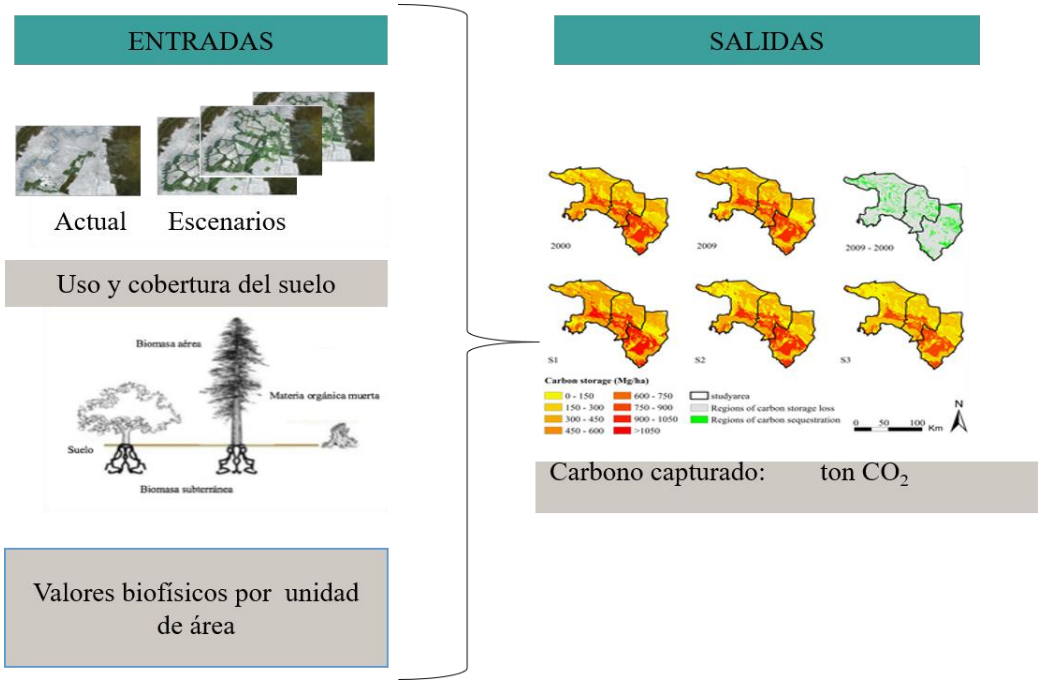


Figura 5. Modelo InVEST para Captura de carbono. Fuente: Elaborado a partir de [24]

Por medio de InVEST [24] se pueden realizar estimaciones y mapeo de los impactos de diferentes alternativas de diseño urbano sobre los servicios ecosistémicos. El modelo de almacenamiento y captura de carbono de InVEST (Ver Figura 5), realiza estimaciones espacializadas de la cantidad de carbono almacenado actualmente o en el tiempo. Como datos de entrada, el modelo emplea mapas de uso del suelo (e.g., actual y para diferentes escenarios), junto con una tabla de datos en la cual se relaciona para cada tipo de cobertura el carbono depositado en la biomasa aérea, subterránea, suelo y materia orgánica muerta. Para realizar la monetización de los servicios ecosistémicos, se pueden incluir datos del mercado o el costo social del carbono, así como una tasa de descuento para estimar el valor de este servicio para la sociedad.

3.2.2. Modelo Sector Manejo Integrado del Agua

Con el fin de evaluar las estrategias para el manejo del agua urbana dentro del contexto de la gestión sostenible del agua se plantea el marco de modelación presentado en la Figura 7. Se seleccionaron dos escalas para la modelación: a nivel de predio y a nivel de microciudad. Respecto a la escala a nivel de predio, se realiza una evaluación tanto técnica como económica de la reducción del consumo de agua potable. Entre las estrategias que se evalúan se incluye la instalación de equipos eficientes (e.g., grifos, sanitarios y duchas ahorradoras) y de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias y reciclaje de aguas grises. Para la evaluación técnica y la comparación de las diferentes estrategias y esquemas de gestión del agua consideradas se utiliza el software WaterMet^2 [25], herramienta que permite estimar distintos flujos relacionados con el ciclo del agua urbana y analizar el desempeño de diferentes medidas de intervención. Su evaluación económica se realiza a partir de los resultados del modelo y de los costos identificados para el contexto local.

Los insumos para el este proceso corresponden a la precipitación diaria que cae sobre las áreas permeables e impermeables del edificio, los volúmenes y los caudales de operación de los equipos eficientes, el área construida, los consumos históricos de agua y los factores de emisión de GEI de cada tecnología. Particularmente, la precipitación diaria (que depende de las condiciones ambientales) y el consumo de agua (que depende de los patrones de consumo y de la disponibilidad hídrica) son variables dinámicas que pueden cambiar en el tiempo. Los resultados obtenidos en esta etapa incluyen el volumen de agua potable consumido, el volumen de aguas grises reutilizadas, el volumen de agua lluvia aprovechada y las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ asociadas a cada tecnología (i.e., sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias y reciclaje de aguas grises). A partir del volumen de agua consumida, se realiza un estimativo del volumen de agua residual que se debería tratar en una PTAR y la cantidad de lodos por volumen de agua tratado. Para esto, se requiere establecer el factor de retorno del agua residual y el factor de generación de lodos según el tratamiento.

A nivel de microciudad, se identifican las áreas en las que la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) es factible y puede generar mayores beneficios. Para esto se proponen tres etapas, las cuales se resumen en la Figura 6. En la primera etapa, se establecen áreas prioritarias considerando el déficit de servicios ecosistémicos de provisión, regulación y socioculturales. Cada área presenta diferentes requerimientos de acuerdo con el tipo de espacio público predominante (e.g., parques, separadores o plazas), los usos de las áreas construidas (e.g., comercial, residencial o institucional) y la densidad de población. A continuación, se seleccionan los espacios potenciales para la implementación de SUDS de acuerdo con las características del espacio público (i.e., tamaño y escala). Finalmente, se define una jerarquía para la implementación de SUDS de acuerdo con los servicios ecosistémicos para los que se haya establecido que el área es prioritaria. Las tipologías de SUDS que se consideran en el análisis son: alcorques inundables, cuenca seca de drenaje extendido, cuentas verdes, zonas de bioretención, pondajes húmedos, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, humedales construidos, cuencas de infiltración, tanques de almacenamiento y techos verdes.

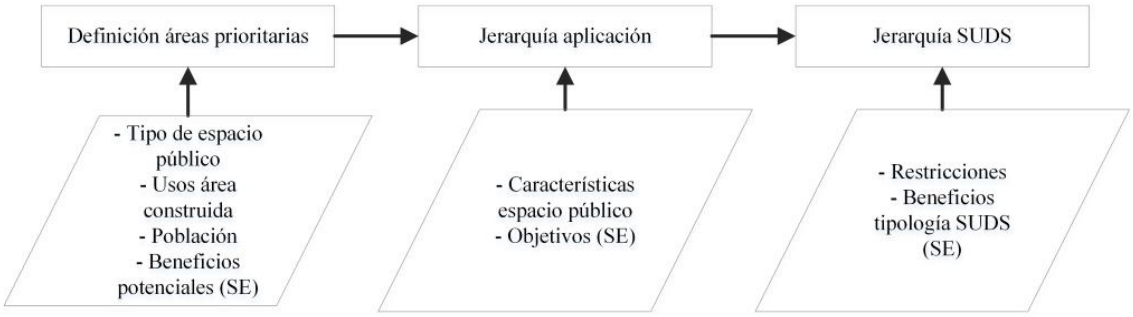


Figura 6. Identificación áreas prioritarias y factibles para SUDS (SE: Servicios ecosistémicos)

En segundo lugar, se realiza la selección de las tipologías específicas para las áreas del espacio público en las cuales la implementación de SUDS es factible y brinda servicios ecosistémicos. Con este objetivo, se emplea el modelo desarrollado por Torres Cajiao et al. [26]. Este selecciona y localiza las tipologías a partir del acople de un sistema de información geográfica (GIS) con un modelo lineal mixto estocástico de dos etapas (TS-MILP). Las entradas del modelo incluyen el listado de tipologías aptas por polígono de espacio, el área de drenaje de los SUDS y su coeficiente de escorrentía y el área de cada polígono que se puede ocupar. Adicionalmente, se requiere información de precipitación, evaporación y costos de cada tipología de SUDS. Particularmente, la precipitación y la evaporación (que dependen de las condiciones ambientales) son variables dinámicas que pueden cambiar en el tiempo. Los costos de las tipologías se estiman por unidad

de área de cada estructura particular mientras que el área para instalar SUDS en cada polígono está restringida por un límite superior, que corresponde al área máxima obtenida del análisis de factibilidad y, un límite inferior, que depende de la naturaleza de la tipología de SUDS. Como resultado del modelo, se obtiene el listado de tipologías más apropiadas para cada polígono, el área que ocupa cada tipología en dicho polígono y la escorrentía que atenúa. Adicionalmente, se estiman los costos de instalación de los SUDS según el escenario de presupuesto seleccionado por el modelo.

A partir de los SUDS seleccionados para cada área, se efectúa la cuantificación de los servicios ecosistémicos que estos proveen mediante técnicas de valoración económica. Entre los beneficios que se evalúan se encuentra la regulación del agua y los servicios de provisión como el suministro de agua. Los resultados obtenidos en esta etapa incluyen los valores económicos equivalentes a los servicios ecosistémicos de cada estructura de SUDS.

Por último, teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante los procesos de modelación, se realiza la estimación del conjunto de indicadores seleccionados para evaluar la sostenibilidad entorno al manejo del agua. Estos corresponden al consumo promedio de agua potable, al agua aprovechada y reutilizada a nivel residencial, el cumplimiento de la calidad requerida del agua, la asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado, la escorrentía descargada, el agua residual tratada al nivel de calidad requerido, las emisiones de $CO_{2\text{-}eq}$ por la gestión del agua urbana, la conciencia pública, la calidad del cuerpo de agua receptor, el índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento, la confiabilidad del sistema de drenaje y el uso multifuncional de la infraestructura verde para el manejo de la escorrentía.

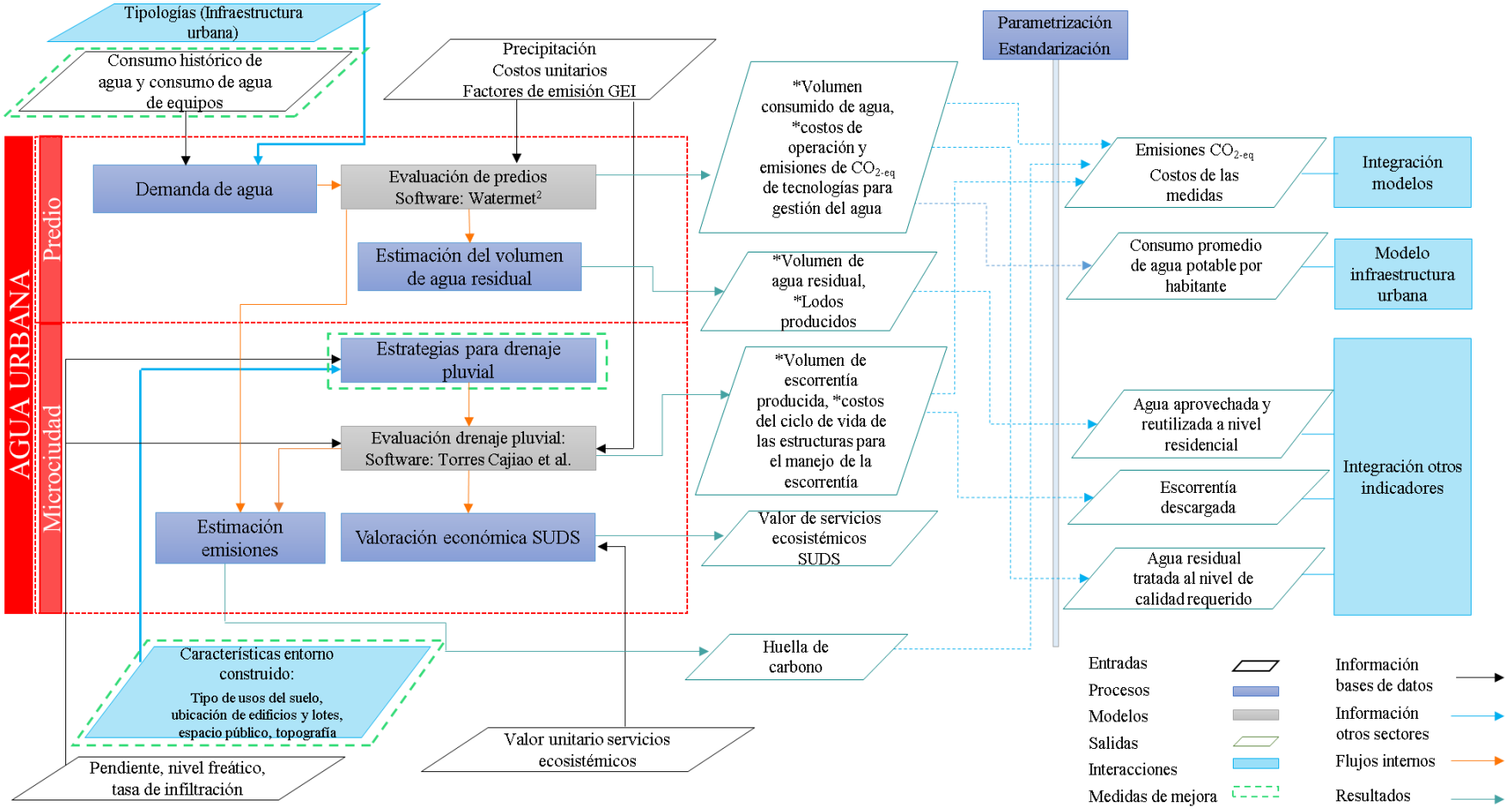


Figura 7. Marco de modelación para los escenarios con la implementación de medidas de manejo

- Descripción de los modelos

De acuerdo con las relaciones que se han identificado entre el uso del agua, energía e impactos ambientales (p.ej. la energía requerida para la potabilización y distribución del agua y las emisiones asociadas al consumo de energía y la descomposición de la materia orgánica en los procesos de tratamiento del agua), es importante que los modelos elegidos permitan analizar distintas escalas, procesos e impactos. Esto con el fin de desarrollar una valoración cuantitativa del manejo del agua en un área urbana. En esta sección se detallan los dos modelos que se consideraron para el análisis de los casos de estudio.

WaterMet^2

WaterMet^2 es un modelo desarrollado por Behzadian et al. [25] como parte del proyecto Transición a los Servicios del Agua Urbanos del Mañana (TRUST). Este modelo permite cuantificar distintos flujos involucrados con el uso del agua en una cuenca urbana (p.ej. el agua potable consumida, el agua gris reutilizada, el agua lluvia aprovechada y el agua residual producida) y analizar el desempeño de distintas estrategias de intervención como el uso de equipos eficientes y de sistemas de reciclaje de aguas lluvias y reúso de aguas grises [27] [25]. El modelo establece un balance de masa diario para el flujo del agua y a partir de este determina flujos de energía, gases de efecto invernadero (GEI), materiales, contaminantes y costos [25]. El análisis se hace a partir de cuatro escalas correspondientes a edificio, local, subcuenca y sistema/ciudad. La escala de edificio representa un área construida sin considerar los alrededores. Puede corresponder a una propiedad con cualquier uso (p.ej. residencial, comercial o industrial). La escala local agrupa un conjunto de edificios con características similares e incluye el área circundante. Esta área circundante se divide en superficies permeables, superficies impermeables y cuerpos de agua. En la escala de subcuenca se agrupan áreas locales cercanas. En la escala de sistema/ciudad se evalúa el grupo de subcuencas definidas junto con otros componentes del sistema de acueducto y alcantarillado. Cada escala involucra distintos componentes como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes y escalas del modelo WaterMet^2. Adaptado de Behzadian y Kapelan [25]

Componente	**Descripción**	**Escala espacial**			
		Sistema/ciudad	**Subcuenca**	**Local**	**Edificio**
Tuberías suministro	Conducción de agua cruda desde el cuerpo de agua hasta la planta de tratamiento de agua potable (PTAP)	x			
Tuberías red matriz	Conducción agua potable desde la PTAP hasta los tanques de almacenamiento	x			
Red de distribución	Distribución de agua potable desde tanques hasta puntos de consumo	x			
Red de alcantarillado combinada o separada	Recolección de agua residual y escorrentía y conducción a una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) o cuerpo receptor	x			
PTAP, PTAR	Tratamiento de agua captada y agua residual	x			
Tanques (reservorios)	Almacenamiento de agua potable antes de su distribución	x			
Fuentes de agua potable	Almacenamiento de agua no tratada	x			
Tanque de almacenamiento de aguas grises	Recolección y tratamiento de agua gris desde puntos de consumo de agua para reúso		x	x	

Componente	Descripción	Escala espacial			
		Sistema/ciudad	Subcuenca	Local	Edificio
Tanque de almacenamiento de agua lluvia	Recolección y tratamiento de agua lluvia de áreas residuales para su aprovechamiento		x	x	
Modelo lluvia-escorrentía	Conversión de la precipitación a escorrentía superficial a partir de especificaciones hidrológicas			x	
Puntos de consumo de agua	Usos de agua interiores y exteriores			x	x

Para la implementación del modelo se requiere información sobre las características del sistema de acueducto y alcantarillado, así como de las superficies de la subcuenca y la demanda de agua potable (ver Tabla 2). Adicionalmente, para establecer los diferentes flujos se debe ingresar información de los recursos necesarios por volumen de agua para el tratamiento y la distribución. Por ejemplo, la energía requerida y, si te tiene disponible, los costos de operación. Los resultados del modelo incluyen nueve tipos de flujos asociados a distintos componentes del sistema para la gestión del agua urbana, como se resume en la Tabla 3.

Tabla 2. Información requerida para el modelo WaterMet²

Proceso/ Sistema	Parámetro
Caudales y precipitación	Precipitación diaria
	Caudales diarios de fuentes de agua
Operación sistemas	Consumo por volumen de agua: Energía, químicos empleados en el tratamiento.
	Costo operacional por año y costos de capital sistema de recuperación de recursos (aprovechamiento de agua lluvia y reúso de aguas grises)
Suministro (acueducto)	Fuentes (superficiales / agua subterránea) y tanques: Volumen de almacenamiento, volumen inicial, pérdidas diarias de agua, caudal diario desviado.
	Red de suministro: Capacidad (volumen diario), caudales diarios, fugas (0 a 1).
	PTAP: Capacidad diaria de tratamiento, pérdidas diarias, lodos generados por volumen tratado y caudal diario desviado.
Subcuenca	Demanda y variación (anual, mensual y/o diaria): Residencial (per cápita por día), industrial/comercial (volumen diario), irrigación (volumen diario), uso público no registrado (volumen diario).
	Propiedades: Número de propiedades, habitantes por casa.
	Áreas: Área total, proporción techos, proporción permeable, proporción pavimentos y caminos, coeficiente de escorrentía subcuenca, coeficiente de infiltración subcuenca.
Drenaje (alcantarillado)	Tipo: Separado / Combinado
	CSO (rebose del sistema de drenaje combinado) y sistema separado: Capacidad diaria, infiltración (%), exfiltración (%), rehabilitación (%).
	PTAR: Capacidad diaria de tratamiento, capacidad de almacenamiento.
Recuperación de recursos hídricos (agua lluvia y aguas grises)	Sistema descentralizado (tanque agua lluvia/ agua gris): Capacidad, volumen inicial, año inicial de operación, usos (sanitario, lavaplatos, lavamanos, ducha, lavadora, industrial, irrigación), porcentaje de remoción de contaminantes.
	Sistema centralizado: Año inicial de operación, usos.

Tabla 3. Resultados del modelo WaterMet². Adaptado de Behzadian y Kapelan [25]

Flujo	Resultado	Componente
Agua (m^3/día)	Demanda de agua: Total, potable, entregada, no entregada, agua lluvia entregada, agua reciclada entregada, domestica, industrial, irrigación, uso público no registrado	Tuberías suministro

Flujo	Resultado	Componente
	Afluente: agua potable, agua lluvia, aguas grises, agua residual, agua residual tratada/ no tratada	Cuerpo de agua suministro, tuberías suministro, PTAP, red matriz, tanque de almacenamiento, red de distribución, red de alcantarillado, PTAR, aprovechamiento de agua lluvia (subcuenca y local), reúso de aguas grises (subcuenca y local), cuerpo de agua receptor
	Fugas	Cuerpo de agua suministro, tuberías suministro, red de distribución, sistema de acueducto y alcantarillado
	Efluentes: Entregado, no entregado, tratado	Cuerpo de agua suministro, tuberías suministro, PTAP, red matriz, tanque de almacenamiento, red de distribución, aprovechamiento de agua lluvia (subcuenca y local), reúso de aguas grises (subcuenca y local)
	Volumen, perdidas, reboses	Cuerpo de agua suministro, PTAP, tanque de almacenamiento, PTAR, red de alcantarillado, aprovechamiento de agua lluvia (subcuenca y local), reúso de aguas grises (subcuenca y local)
	Reboses tanque de tormenta, reboses alcantarillado combinado, excesos de agua lluvia, excesos de agua residual	Red de alcantarillado
Energía (KWh/día)	Total, electricidad, combustibles fósiles, incorporada	Todos los componentes
GEI (Ton CO_2- eq/día)	Total, basado en CO_2, causados, evitados	Todos los componentes
	Basado en CH_4, basado en NO_2	PTAR
Acidificación (Ton SO_2- eq/día)	Total, basada en SO_2, causada, evitada	Todos los componentes
	Basada en NH_3, basada en NO_2	PTAR
Eutroficación Ton PO_4- eq/día)	Total, basada en PO_4, causada, evitada	Todos los componentes
	Basada en NH_3, basada en NO_3, DQO, fosforo	Tuberías suministro, red de alcantarillado, PTAR, cuerpo de agua receptor
Materiales	Masa, longitud	Red de distribución, red de alcantarillado
Químicos	Masa	PTAP, tanque de almacenamiento, PTAR
Contaminantes (kg/día)	Carga contaminante (entrada, salida), lodo generado	Red de alcantarillado, PTAR, aprovechamiento de agua lluvia (subcuenca y local), reúso de aguas grises (subcuenca y local), cuerpo de agua receptor
	Carga contaminante: total, efluente PTAR tratado, efluente no tratado PTAR, rebose no tratado tanque de tormenta	Red de alcantarillado, PTAR, cuerpo de agua receptor
Costos (Euro/ día)	Operacional	Todos los componentes

Este modelo permite evaluar distintos escenarios futuros considerando diferentes estrategias para la disminución de la demanda de agua [27]. Las ventajas de este modelo se derivan de las escalas que incluye. Se pueden establecer los usos finales para el agua lluvia y el agua gris empleada en la escala local. A su vez, es una ventaja que la escala local permita diferenciar área construida y no construida, para realizar un análisis más preciso de la demanda y el volumen de agua lluvia disponible. Adicionalmente, permite cuantificar los impactos asociados al consumo del agua, particularmente los derivados de la relación energía- agua [25]. En cuanto a las desventajas, se debe resaltar que no es imposible integrar SUDS de manera directa. Una desventaja adicional es que el modelo no considera la energía requerida para los usos finales del agua en los edificios para la definición de los flujos de energía [25]. Por ejemplo, la energía requerida para bombear el agua potable a los pisos superiores de una edificación.

Torres et al. [26]

Este modelo selecciona y localiza las tipologías de SUDS a partir del acople de un sistema de información geográfica (GIS) con un modelo lineal mixto estocástico de dos etapas (TS-MILP). El modelo incorpora tres funciones objetivo: (1) la minimización del volumen de escorrentía descargado, (2) la maximización de los beneficios relacionados con la provisión de servicios ecosistémicos y (3) la minimización de los costos de construcción y mantenimiento de las tipologías. Cuanto se optimiza la siguiente función objetivo, se permite un detrimento de máximo el 10% de los resultados obtenidos para la función anterior.

La información requerida por el modelo se presenta en la Tabla 4. Dicha información incluye el listado de tipologías aptas por polígono de espacio, el área de drenaje de los SUDS y su coeficiente de escorrentía y el área de cada polígono que se puede ocupar. Adicionalmente, se requiere información de precipitación y evaporación, así como costos de construcción, operación y mantenimiento de cada tipología de SUDS. La resolución temporal del modelo depende de la resolución del evento de lluvia analizado, ya sea un evento frecuente o extremo. A su vez, los costos de las tipologías se estiman por unidad de área de cada estructura particular mientras que el área para instalar SUDS en cada polígono está restringida por un límite superior, que corresponde al área máxima obtenida del análisis de factibilidad y, un límite inferior, que depende de la naturaleza de la tipología de SUDS.

La capacidad de almacenamiento de cada polígono depende de una profundidad genérica, que es establecida para cada tipología de SUDS. Las tasas de evaporación e infiltración dependen de la tipología de SUDS y del terreno particular. Otras variables que se definen para la implementación del modelo son el presupuesto disponible para la construcción de las estructuras y un parámetro ficticio que toma un valor de 1 si el periodo de tiempo es seco o húmedo. Este último es relevante ya que el modelo se construye bajo dos supuestos: i) un evento de lluvia se puede dividir en un período húmedo y seco y ii) la escorrentía se genera solo durante el período húmedo, mientras que la evaporación se presenta en el periodo seco.

Tabla 4. Información requerida y resultados para el modelo Torres et al. [26]

<table>
<tr><th colspan="2">Entradas</th><th>Salidas</th></tr>
<tr><td>Resolución temporal</td><td>Delta de tiempo</td><td rowspan="10">Reducción escorrentía.
Tipo y localización de SUDS
Costos</td></tr>
<tr><td>Áreas de drenaje</td><td>Áreas de drenaje de los SUDS
Coeficientes de escorrentía</td></tr>
<tr><td>Precipitación y evaporación</td><td>Probabilidad ocurrencia escenarios precipitación (0-1)
Información de los escenarios de precipitación
Evaporación</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Espacios disponibles para instalar SUDS y almacenar escorrentía</td><td>Tipologías de SUDS factibles</td></tr>
<tr><td>Ubicación de los polígonos factibles para la instalación de SUDS</td></tr>
<tr><td>Volumen de escorrentía de acuerdo con el delta de tiempo</td></tr>
<tr><td>Área máxima disponible en el polígono</td></tr>
<tr><td>Área mínima tipología</td></tr>
<tr><td>Beneficios proporcionados por los SUDS</td></tr>
<tr><td>Costos</td><td>Instalación tipologías
Mantenimiento y operación de las tipologías</td></tr>
</table>

Como resultado, se obtiene el listado de tipologías más apropiadas para cada uno de los polígonos, el área que ocupa cada tipología en dicho polígono y la escorrentía que atenúa. Adicionalmente, se estiman los

costos de instalación de los SUDS según el escenario de presupuesto seleccionado por el modelo. Una de las ventajas de este modelo es que permite evaluar distintos escenarios de precipitación. A su vez, es un modelo flexible puesto que es posible definir un delta de tiempo de acuerdo con la información disponible.

3.2.3. Modelo Sector Energía

El modelo desarrollado desde el sector energía permite la evaluación de tecnologías de generación y almacenamiento distribuido para el sector residencial y alumbrado público con posibilidad de adaptarse a otros sectores de consumo tales como el sector comercial. A través de la caracterización e integración de la demanda de energía en los diferentes sectores y de la caracterización de tecnologías de suministro distribuido y del potencial de generación de diferentes tecnologías, el modelo permite: evaluar la línea base de emisiones mitigadas/causadas por tecnologías de generación y almacenamiento distribuido, y dimensionar de manera óptima medidas de mejora orientadas a tecnologías de suministro de energía distribuido bajo restricciones técnicas, geográficas y económicas, y escenarios de indicadores tales como el autosuministro de energía. Para el caso particular de tecnologías de generación térmica intermitentes que requieren de un sistema de almacenamiento dedicado, el modelo realiza un análisis de escenarios de dimensionamiento.

En la Figura 8 se ilustra el modelo a través del cual se logran los objetivos anteriormente delimitados. Las entradas a este modelo pueden ser vistas desde dos perspectivas: oferta y demanda. Desde la demanda se busca caracterizar la información acerca del consumo de servicios energéticos (electricidad y gas), y los perfiles que definen patrones de consumo típicos, en los diferentes sectores involucrados en el proyecto, principalmente lo concerniente al consumo de energía en edificaciones y alumbrado público. Desde la oferta, para el desarrollo de la línea base se caracterizan aquellas tecnologías de generación, almacenamiento y respaldo de energía que se encuentran operando en el caso de estudio. Por otro lado, se requiere caracterizar, en caso de contar con dicha información, las redes de distribución tanto eléctricas como de gas a través de las cuales se suministra el servicio. En caso de disponer de tecnologías de energía renovable intermitentes tales como solar fotovoltaica, se requiere como entrada los perfiles históricos de las variables meteorológicas asociadas a la tecnología en cuestión. Para la evaluación de medidas de mejora asociadas a generación y almacenamiento de energía, adicional a las entradas definidas anteriormente, se requiere como entrada la caracterización del entorno construido en términos de los espacios disponibles para implementación de tecnologías, usualmente techos de edificaciones y predios dispuestos para este fin. A su vez, es necesario realizar la caracterización tanto técnica como económica de aquellas tecnologías que se desean evaluar a través del modelo. Una descripción de las diferentes entradas y parámetros se encuentra en la Tabla 5.

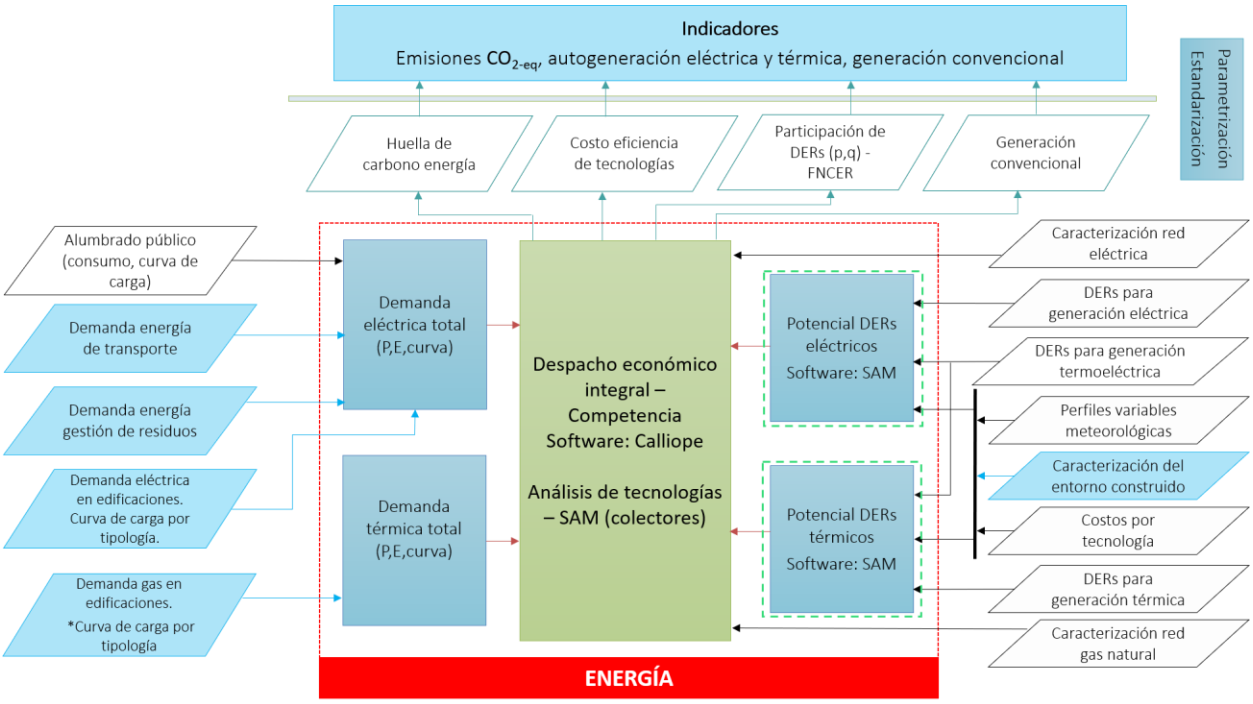


Figura 8. Diagrama de cajas modelo sector energía

Por otro lado, las salidas de este modelo corresponden a indicadores que reflejan el estado desde el punto de vista de energía y general del caso de estudio, y el resultado de la evaluación de las medidas de mejora en cuanto a su potencial de generación y mitigación. Dentro de estas salidas se encuentra la huella de carbono dada por la mitigación de emisiones resultante de la energía que deja de ser importada por el caso de estudio y es generada por las Microredes y los Recursos de Energía Distribuida (DERs), la participación de DERs definida por la autosuficiencia energética resultante de las tecnologías existentes o medidas evaluadas, participación de generación convencional de respaldo, y la costo-eficiencia de las medidas de mejora evaluadas. Es de destacar que, a pesar de no estar explicitas en el diagrama, existen variables internas que fueron utilizadas para el cálculo de las salidas, pero no son consideradas como tal. Sin embargo, tienen un valor agregado en los intereses del sector. Una descripción de las variables y las salidas del modelo se presentan en la Tabla 6.

Funcionalidades

- Dimensionamiento de las capacidades de tecnologías de generación y almacenamiento distribuidos en lotes y edificaciones basado en consideraciones económicas (mínimo costo) y/o técnicas (nivel de penetración de renovables deseado, número de unidades deseadas).
- Valoración económica de las tecnologías de generación a considerar.
- Despacho económico horario para un horizonte de análisis definido.
- Valoración energética de tecnologías existentes en el caso de estudio (línea base).

Limitaciones

- Poca flexibilidad en la construcción de la función objetivo de optimización del modelo.

- Los tiempos de corrida pueden llegar a ser significativos cuando se considera un gran número de agentes (generadores, consumidores, prosumidores) y un amplio horizonte de análisis.
- No es posible la integración de modelos dinámicos con el modelo. Específicamente, modelos térmicos intermitentes, como por ejemplo un sistema de calentamiento de agua a través de colectores solares con su respectivo tanque de almacenamiento térmico. En consecuencia, esta medida fue evaluada fuera de la herramienta central en el software SAM.
- Poca integración de estrategias de gestión de la demanda.

Entradas

Tabla 5. Entradas y parámetros del modelo del sector energía

Entradas		
Nombre	**Descripción**	**Fuente de información**
Variables meteorológicas	Series de tiempo que definen perfiles históricos (y de ser posible pronósticos) de variables meteorológicas que permitan evaluar el potencial de tecnologías renovables de generación. Por ejemplo, radiación solar, temperatura y velocidad del viento	Bases de datos especializadas (NREL, IDEAM, PVGIS)
Área disponible en techos y lotes	Caracterización geográfica de las áreas disponibles en edificaciones y lotes candidatos para la implementación de tecnologías de generación y almacenamiento distribuidos	Planos del caso de estudio. Sistema de Información Geográfica (ArcGIS)
Costos históricos y proyecciones de electricidad y gas	Series de tiempo que definen perfiles históricos del precio de tanto electricidad como de gas natural para diferentes sectores de consumo (residencial, comercial)	Empresas de suministro de servicios de energía (CODENSA, Gas Natural Vanti para Soacha). Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
Demanda de energía y perfil de consumo por sector	Series de tiempo de resolución flexible (diaria, mensual, anual) del consumo energético de los diferentes sectores de consumo encontrados en el caso de estudio. Perfil típico de consumo por sector	Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Estudios de caracterización de demanda energética
Demanda de agua y perfil de consumo para aseo personal	Series de tiempo de resolución flexible (diaria, mensual, anual) del consumo de agua caliente de los diferentes sectores de consumo encontrados en el caso de estudio. Perfil típico de consumo residencial	Expertos del sector de aguas
Redes de distribución (electricidad y gas)	Plano eléctrico del sistema de distribución eléctrico y de gas que provee del servicio al caso de estudio	Planos eléctricos y de tuberías de gas. Imágenes satelitales.
Tecnologías de generación y almacenamiento existentes (diésel, DERs eléctricos y térmicos)	Caracterización de tecnologías de generación y almacenamiento, y respaldo de energía existentes en el caso de estudio. Esta caracterización incluye capacidad, eficiencia y despacho histórico	Operador de red eléctrica, propietarios de generadores
Parámetros		
Nombre	**Descripción**	**Fuente de información**
Parámetros técnicos típicos de tecnologías de medidas de mejora	Caracterización de parámetros típicos de tecnologías de generación y almacenamiento asociadas a las medidas de mejora a evaluar. Por ejemplo, para paneles fotovoltaicos, área típica de panel, capacidad nominal de generación, perdidas por conversión, entre otros.	Fabricantes típicos de las tecnologías en cuestión. System Advisor Model (SAM, NREL)
Costos históricos y proyecciones de costos de medidas de mejora	Caracterización de costos de capital (CAPEX), operación y mantenimiento (OPEX) y otros costos asociados a la implementación de tecnologías de generación y almacenamiento distribuido	Annual Technology Database (NREL)

Salidas y variables

Tabla 6. Salidas y variables del modelo del sector energía

Salidas		
Nombre	**Descripción**	**Indicador asociado**
Participación de DERs - FNCER	Define la participación de recursos de energía distribuidos en el suministro parcial de la demanda energética del caso de estudio en cuestión	Autosuficiencia energética
Huella de carbono de energía	Define las emisiones agregadas por consumo de energía y la mitigación resultante de tecnologías existentes en el caso de estudio (línea base) y el potencial de mitigación de las medidas de mejora	Emisiones de CO2eq por consumo de energía, Mitigación de CO2 por DERs
Costo-eficiencia de medidas de mejora	Define la costo-eficiencia de las tecnologías para la mitigación de emisiones de las medidas a evaluar	Costo-eficiencia de medidas
Variables		
Nombre	**Descripción**	
Capacidad de generación/almacenamiento de DERs	Define la capacidad de generación y almacenamiento de las medidas evaluadas bajo el modelo que cumplen criterios de mínimo costo bajo las restricciones definidas	
Área ocupada por DERs	Define el área total ocupada por aquellos DERs para los cuales se pueda definir una ocupación espacial (paneles PV, colectores)	
Despacho de DERs	Define la generación, carga o descarga de las tecnologías de generación y almacenamiento evaluadas para una resolución temporal flexible (desde horaria hasta anual)	
Costos de generación y consumo de energía	Define el análisis de costos asociado al consumo de energía y a la generación de esta a través de DERs a lo largo del horizonte de análisis. Puede verse como una serie de tiempo para una resolución flexible, o valores escalares que evalúen las alternativas tales como el *levelized cost of energy*	

- Descripción del modelo

Similar a las entradas, el modelo puede entenderse como dos partes asociadas hacía la oferta y la demanda, a través del cuales se procesa y de adapta la información dada como entrada para ser ingresada al núcleo central del modelo. Desde el lado de la demanda, se integra la información recibida desde los diferentes sectores con el fin de separarla en demanda de energía eléctrica y térmica, definiendo series de tiempo que ilustran los patrones de consumo de cada sector. Desde el lado de la oferta, se procesa la información de tal manera que se defina la información necesaria para establecer el potencial de cierta medida de mejora en el caso de estudio. Para el caso particular de tecnologías renovables intermitentes, se definen perfiles de generación de energía, tanto históricos como pronosticados, para aquellas medidas de mejora que involucran tecnologías renovables intermitentes. Los perfiles históricos se obtienen a través del software libre System Advisor Model (SAM) desarrollado por NREL, mientras que los pronósticos se realizar a través de la librería de Python PVlib. Para las demás tecnologías en general, se procesan los parámetros técnicos, económicos y espaciales asociados a cada una. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 8 para la generación eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Dicha información es entrada al bloque central, a partir del cual se evalúan las tecnologías, tanto existentes como aquellas correspondientes a medidas de mejora, a partir de la demanda caracterizada.

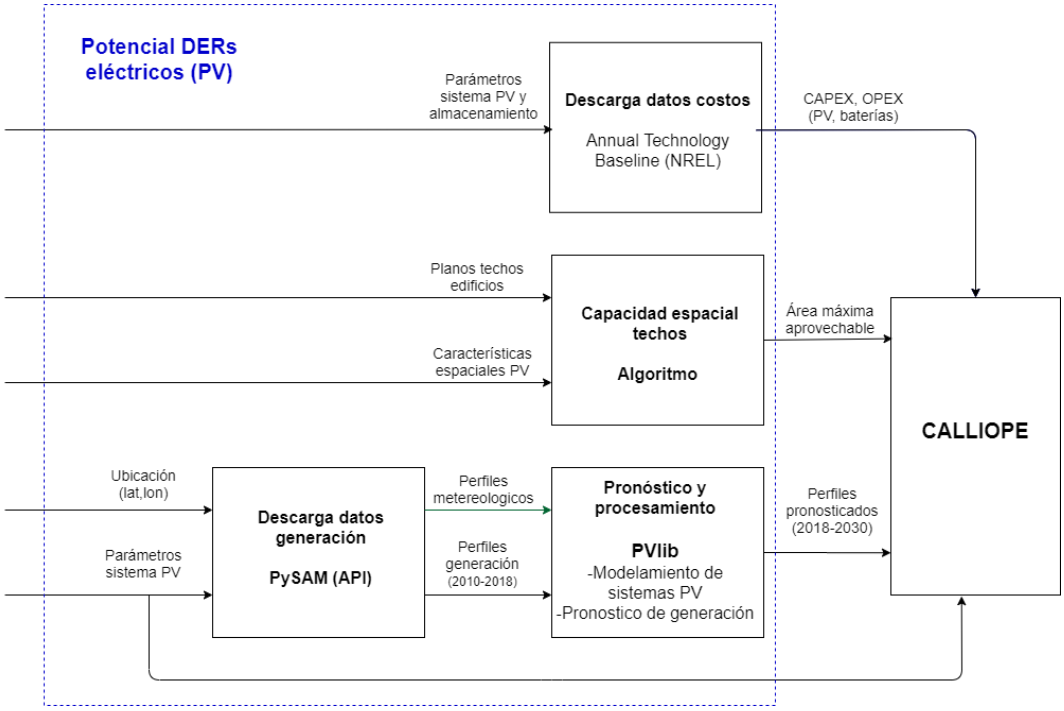


Figura 9. Metodología para evaluar potencial de medida de mejora de paneles fotovoltaicos (PV)

El bloque central realiza la evaluación de las tecnologías definidas desde la oferta para el suministro parcial o total de la demanda caracterizada. Lo anterior se lleva a cabo a través de un despacho óptimo que realiza el balance energético de oferta y demanda con el fin de cumplir los objetivos dados para evaluación de línea base como la evaluación de medida de mejora. Desde el punto de vista de línea base, se evalúan tecnologías existentes a la luz de diferentes indicadores tales como la participación de DERs en el suministro de la demanda a través de la autosuficiencia energética, las emisiones mitigadas por estas tecnologías y la participación de energía de respaldo convencional (diésel). En el caso de la evaluación de medidas de mejora, el despacho económico permite realizar una valoración técnico-económica de las medidas de interés a través del dimensionamiento óptimo en términos económicos de la capacidad, tanto de generación como de almacenamiento, de éstas. A partir de este resultado, y del despacho resultante de estas tecnologías, es posible determinar los indicadores anteriormente mencionados, así como la costo-eficiencia de cada una de las tecnologías. Este despacho se puede realizar a diferentes escalas, ya sea modelando el caso de estudio como un solo agente, o modelando cada manzana o cada conjunto residencial como un agente. En estos dos últimos casos, dentro de las entradas al modelo se tendrá que definir las redes de distribución que interconectan dichos agentes. La librería de Python Calliope es utilizada para la implementación de lo anteriormente descrito como el núcleo del modelo de energía. En la Figura 10 se presenta un diagrama simplificado del funcionamiento interno de Calliope.

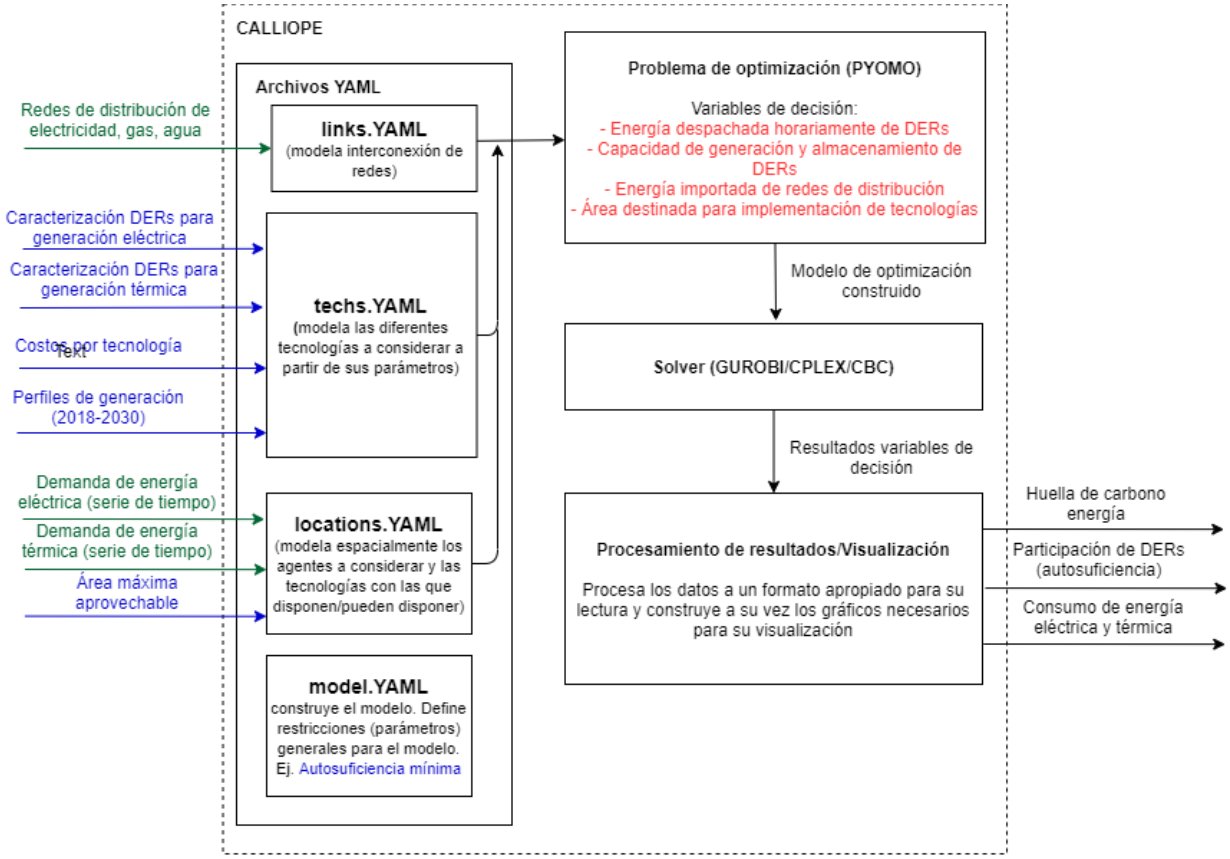


Figura 10. Funcionamiento interno de Calliope

Es importante destacar que Calliope se encuentra limitado para aplicaciones que involucran generación térmica intermitente. Por ejemplo, como se verá en secciones posteriores, una de las medidas de mejora corresponde al calentamiento de agua para aseo personal a través de colectores térmicos. Debido a la intermitencia en la generación térmica de esta tecnología, es necesario tener un tanque dedicado de almacenamiento térmico a través del cual se pueda extraer el agua precalentada cuando se requiera. Las dinámicas inherentes del sistema colector y tanque de almacenamiento no se pueden simplificar al nivel que lo requiere Calliope, por lo tanto, fue necesario evaluar esta tecnología a través de la herramienta SAM de NREL. Esta es una herramienta de análisis, la cual no necesariamente dimensiona tecnologías, sino que evalúa escenarios de dimensionamiento de tecnologías, y lo hace de manera aislada con respecto a otras tecnologías. Con el fin de aliviar la anterior debilidad, como trabajo futuro se considera emplear herramientas similares a Calliope que hacen parte del *Open Energy Modelling Initiative*. Dentro de los posibles candidatos encuentra OeMOF, el cual permite acoplar el despacho óptimo con modelos dinámicos de sistemas térmicos como el sistema previamente mencionado.

3.2.4. Modelo Sector Residuos

Para la modelación de la línea base y los escenarios con la implementación de medidas de mejora, se empleó, por un lado, el modelo IPCC para inventarios de GEI en sitios de disposición final. Este modelo tiene por objetivo calcular las emisiones de metano producidas por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias en los sitios de disposición final de residuos sólidos. El método emplea una reacción de decaimiento de primer orden para cuantificar el metano generado por la descomposición

anaerobia de residuos sólidos dispuestos. Ofrece parámetros estándar para alimentar las ecuaciones que utiliza si el país o caso de estudio no cuenta con información específica para cada parámetro. El metano generado año a año está determinado por la cantidad de materia orgánica degradable en condiciones anaeróbicas remanente en el sitio de disposición final. El modelo de desechos del IPCC está formulado para realizar inventarios nacionales de GEI, sin embargo, para efectos de la línea base de GEI de este proyecto, el modelo se adaptó para cuantificar las emisiones generadas por la disposición de residuos provenientes de uno de los macroproyectos de vivienda estudiados (Ciudad Verde), asumiendo, por ejemplo, que en el relleno sanitario receptor se empezó a disponer residuos desde el año que Ciudad Verde empezó a estar habitado.

Adicionalmente, se calcularon las emisiones generadas por el transporte de residuos sólidos, tanto en la línea base como en los escenarios con medidas de mejora. En este proceso se utiliza como información de entrada las características de operación de los vehículos empleados, de los combustibles utilizados (i.e. factores de emisión), las distancias recorridas desde la fuente de generación hasta el sitio de tratamiento o disposición de residuos, además de la cantidad anual de residuos a transportar.

Para la modelación de los escenarios, se utilizó además el software WRATE. Este recibe como información de entrada las características de la matriz energética de la zona geográfica de interés, la cantidad anual y composición de los residuos a gestionar, el tipo de instalaciones utilizadas dentro de la gestión de residuos en el escenario planteado, su capacidad anual y el porcentaje de residuos que serán gestionados en cada una de las instalaciones seleccionadas. Las instalaciones de gestión de residuos disponibles en el software abarcan los procesos de recolección, transporte, instalaciones intermedias, como estaciones de transferencia y de clasificación y aprovechamiento, plantas de reciclaje, otras plantas de tratamiento y aprovechamiento y sitios de disposición final. Con los datos proporcionados e información de base contenida en el programa para cada una de las alternativas de gestión, la matriz energética y los materiales presentes en los residuos gestionados, el software realiza el análisis de ciclo de vida (ACV) sobre el sistema de recolección y tratamiento de residuos de interés, calculando seis indicadores, entre ellos, las emisiones de GEI. Con el enfoque de ACV, se considera el impacto de las entradas al sistema de gestión (residuos, energía y materiales) y las salidas (materiales recuperados, compost, emisiones atmosféricas, agua residual, productos residuales).

Así pues, se incluyen las emisiones asociadas a la operación de las instalaciones de gestión de residuos y las generadas, además, por su construcción, mantenimiento y futuro desmantelamiento, contemplando así todas las etapas de su ciclo de vida. Para efectos de integración con los demás sectores del proyecto, se extrae de los resultados del modelo las emisiones del sistema de gestión de residuos (exceptuando el relleno sanitario) asociadas a la degradación anaerobia, las emisiones por consumo de energía en los procesos, ahorros en emisión por producción de energía a partir de residuos y ahorros en emisiones por los materiales obtenidos del reciclaje en lugar de fuentes vírgenes. El software analiza escenarios durante un periodo de tiempo específico, en este caso un año, por lo que la modelación de los escenarios con las medidas propuestas desde 2018 hasta 2030 se realizó para cada año por separado.

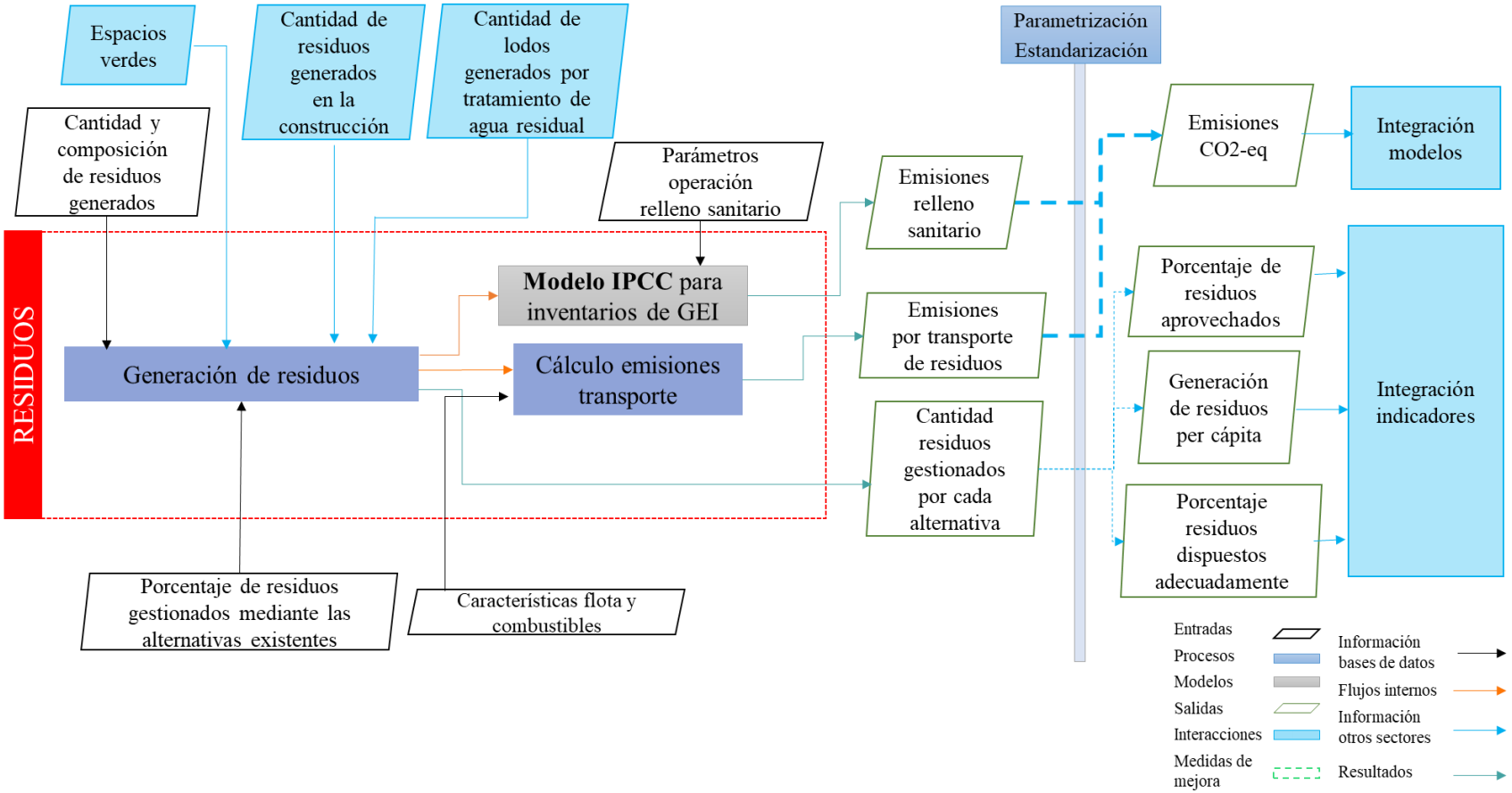


Figura 11. Diagrama de cajas de modelo para estimación de línea base.

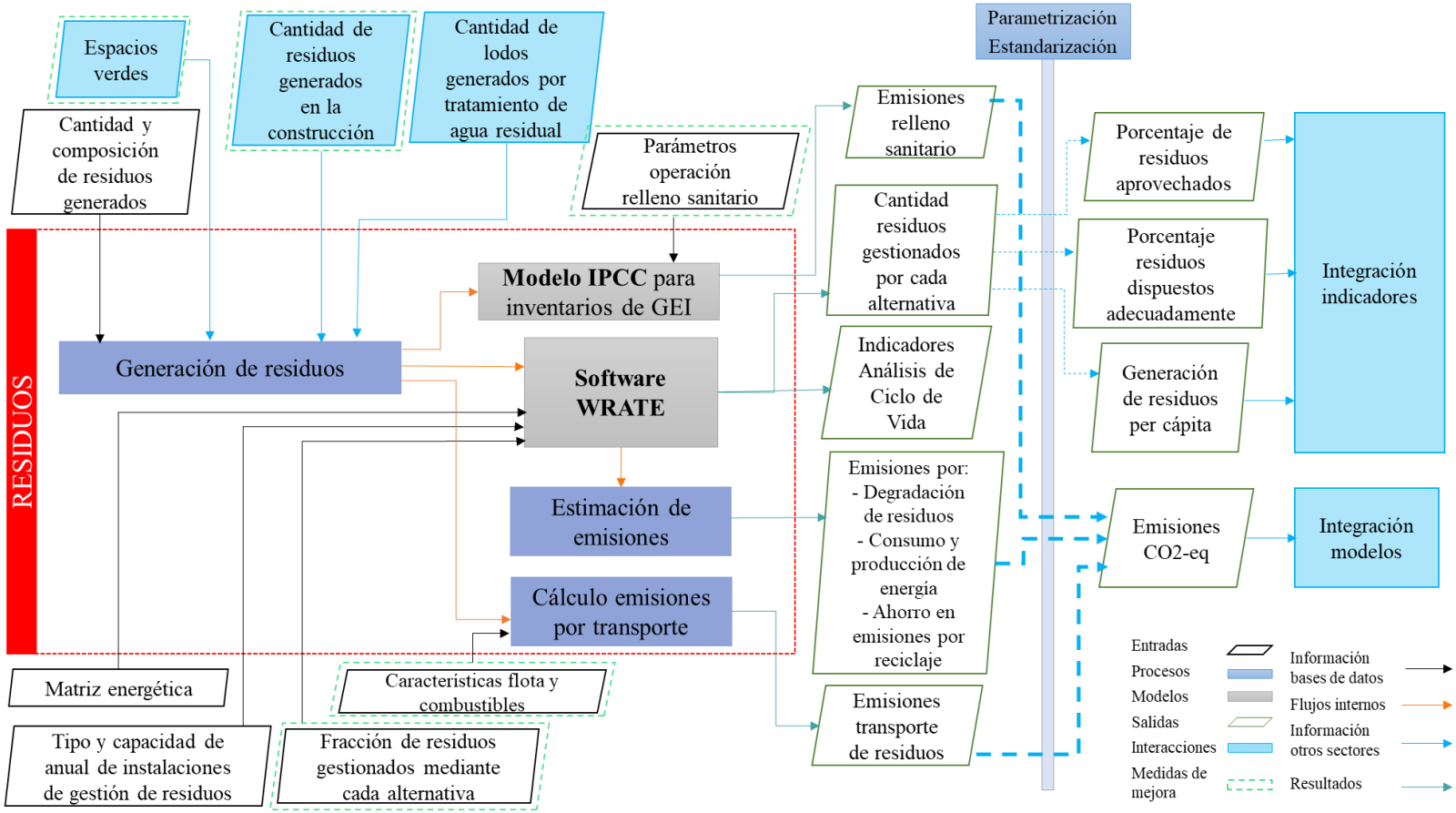


Figura 12. Diagrama de cajas de modelo para estimación de indicadores en escenarios con implementación de medidas de mejora.

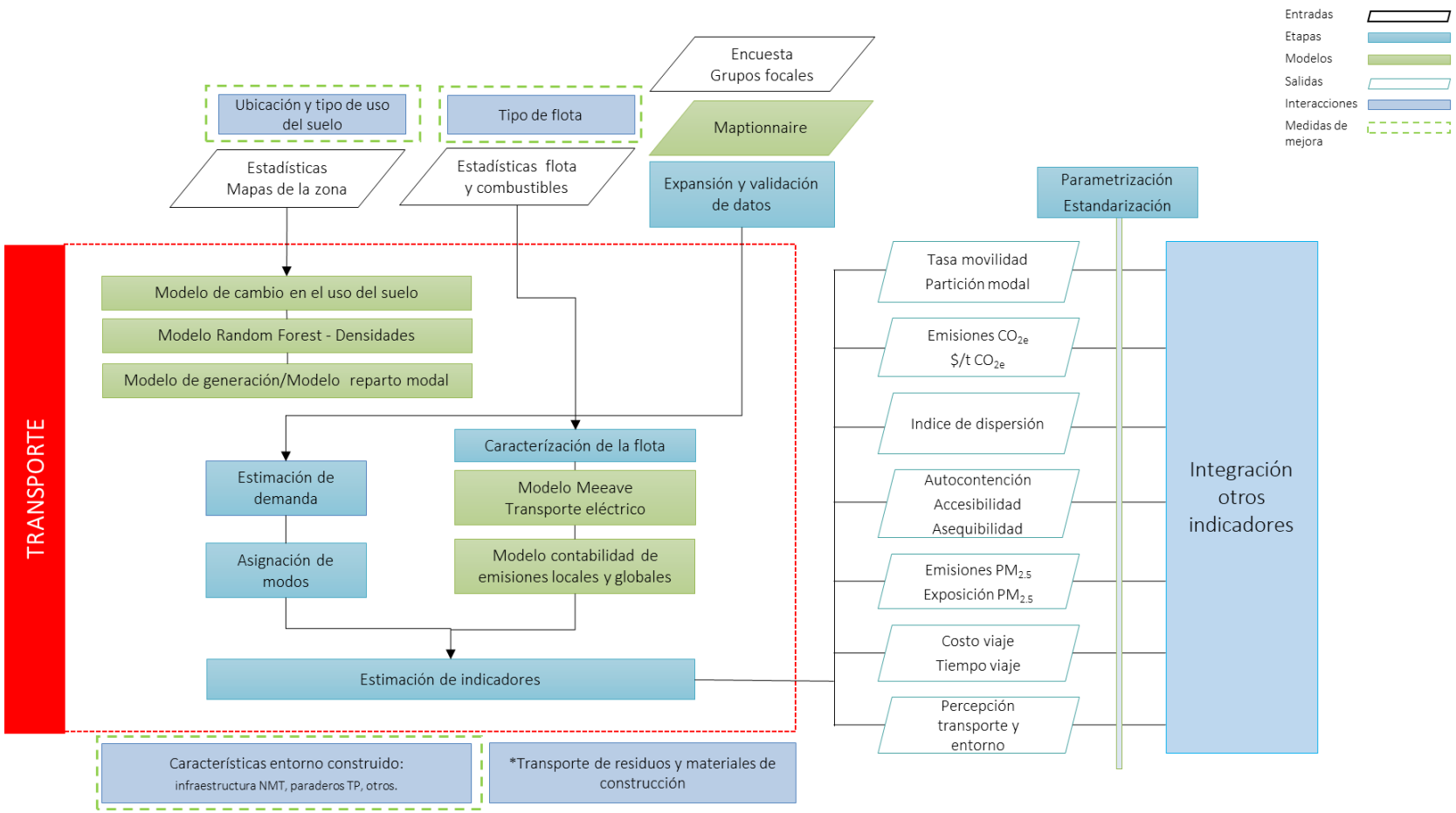
3.2.5. Modelo Sector Transporte

El modelo del sector transporte se resume en la Figura 13. Este se basa en marcos de modelación propuestos en la literatura para análisis de medidas de mitigación de gases efecto invernadero del transporte [28] [29], los cuales se ampliaron para incluir los indicadores seleccionados sobre calidad de vida y competitividad económica.

Las tres herramientas de modelación principales son: i) un modelo de cambio en los usos del suelo basado en autómatas celulares, a través del software Metronamica; ii) un modelo de generación de viajes y reparto modal calibrado para Bogotá; y iii) un modelo de contabilidad de emisiones (ver Figura 13). Adicionalmente, se utilizó la plataforma Maptionnaire para el desarrollo de las encuestas en Ciudad Verde. Con las flechas se muestran las interacciones entre las herramientas de modelación y finalmente, se presenta cómo se estiman los indicadores asociados al transporte (paralelogramos al lado derecho). En la Tabla 7 se muestran las características generales de las herramientas de modelación y más adelante, una caracterización. En la

Tabla 8 se listan las entradas y salidas de las herramientas de modelación.

Los escenarios con medidas de mejora se modelan a través de modificaciones en tres bloques principales (ver cuadros punteados en verde). El análisis de las medidas de mitigación de emisiones GEI y opciones de mejora, tiene que ver con cambios en los usos del suelo, las características del entorno construido y su impacto en la demanda de transporte y partición modal; mejoras en la tecnología de la flota; y mejoras en la oferta de transporte público y su efecto en partición modal.



CV: Ciudad Verde; LT: Lagos de Torca; OD: Origen-Destino; NMT: no motorizado; TP: Transporte público.

Figura 13. Marco de modelación del sector transporte.

Tabla 7. Descripción de modelos propuestos para el análisis del sector transporte.

Modelo	Modelo cambio en los usos del suelo	Maptionnaire	Modelo generación/Modelo reparto modal	Modelo contabilidad de emisiones
Objetivo	Modelos de simulación de cambios de usos del suelo basados en autómatas celulares para analizar la relación entre la estructura del espacio urbano y los sistemas de transporte.	Es una herramienta de captura de información con el objetivo principal de involucrar a la comunidad en procesos participativos son cuestionarios geolocalizados. Se clasifica dentro de los Sistemas de Información Geográfica Participativo Público (PPGIS).	Estimación de viajes el reparto modal de los viajes generados en la zona de estudio, acorde con características socioeconómicas de la población.	Modelo input-output, simulación de escenarios para análisis de emisiones de contaminantes locales y globales.
Tipo de modelo	Simulación	Herramienta de captura de información	Simulación	Simulación, contabilidad de emisiones
Software libre	No	No	Formulación disponible	Formulación disponible
Artículo de referencia	Guzman, Escobar, Peña, Cardona, "A cellular automata-based land-use model as an integrated spatial decision support system for urban planning in developing cities: The case of the Bogotá region", Land Use Policy, 92, 104445. 2020.	Developing a framework for assessment of the environmental determinants of walking and cycling. Social Sciences & Medicine, vol. 56, pp. 1693-1703. Pikora, Giles-Corti, Bull, 2003.	Cherchi Ortuzar, "Mixed RP/SP models incorporating interaction effects", Transportation 29, 371-395. 2002.	Espinosa, Cadena, Behrentz, "Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector", Energy Policy 124, 111-122. 2019.

Tabla 8. Entradas y salidas de las herramientas de modelación de transporte.

Modelo cambio en los usos del suelo	
Entradas	- Mapas históricos sobre usos del suelo para calibración del modelo. - Escenarios futuros sobre usos del suelo, incluyendo nueva infraestructura de transporte (mapas).
Salidas	- Configuración del uso del suelo resultante en cada escenario evaluado (mapas). A partir de estos mapas de salida es posible, por ejemplo, determinar cambios en distancias de los viajes desde la micro-ciudad hacia centros de trabajo y los tiempos de viaje asociados. - Impacto en usos del suelo que resulta de implementar nueva infraestructura de transporte. Es importante mencionar que los cambios en distancia de viajes son un insumo para el módulo de contabilidad de emisiones.
Modelo de contabilidad de emisiones	
Entradas	Para cada escenario: - Demanda de transporte por modos. - Distribución modal de los viajes. - Características de la flota de transporte, que determina el consumo de combustible y los factores de emisión de los contaminantes locales. Esta información adicionalmente es la base para la estimación de otros indicadores como, por ejemplo, el costo del transporte.
Salidas	- Demanda de combustible por modo y categoría vehicular. - Emisiones de contaminantes locales y globales por modo y categoría vehicular.
Modelo generación/Reparto modal	
Entradas	- Información de caracterización socioeconómica de la población, densidad de población, distancias medias el centro distrital de empleo.
Salidas	- Número de viajes para el área de estudio y reparto modal acorde a características socioeconómicas de la población de estudio.

3.2.6. Modelo Sector Edificaciones

En la Figura 14 se presenta el modelo del sector de edificaciones e infraestructura urbana. Dicho modelo sectorial permite, entre otras cosas, cuantificar las emisiones incorporadas del entorno construido del macroproyecto y determinar tanto el consumo energético como las emisiones asociadas a la operación de las edificaciones. Este modelo tiene en cuenta diferentes etapas propias del análisis de ciclo de vida (i.e., la etapa de concepción y diseño, la etapa de producto y construcción y la etapa de operación). El análisis de las edificaciones incluye todas las etapas mencionadas mientras que el análisis realizado para la infraestructura urbana no incluye la etapa de operación.

En la etapa de concepción y diseño se definen diferentes parámetros de las edificaciones y de la infraestructura urbana. En esta etapa se establecen los diseños arquitectónicos, estructurales y urbanísticos, así como las propiedades de los materiales a utilizar en la construcción. En la etapa de producto y construcción, se cuantifica el carbono incorporado del ambiente construido y se determina la generación de residuos de las edificaciones. El cálculo del carbono incorporado incluye la extracción de la materia prima, el transporte hasta la fábrica, la manufactura de los insumos, el transporte hasta la obra y la construcción del proyecto. El alcance del análisis en esta etapa depende de la unidad estudiada: para las edificaciones se incluyen todas las fuentes mencionadas anteriormente mientras que para la infraestructura urbana se incluyen únicamente las primeras tres.

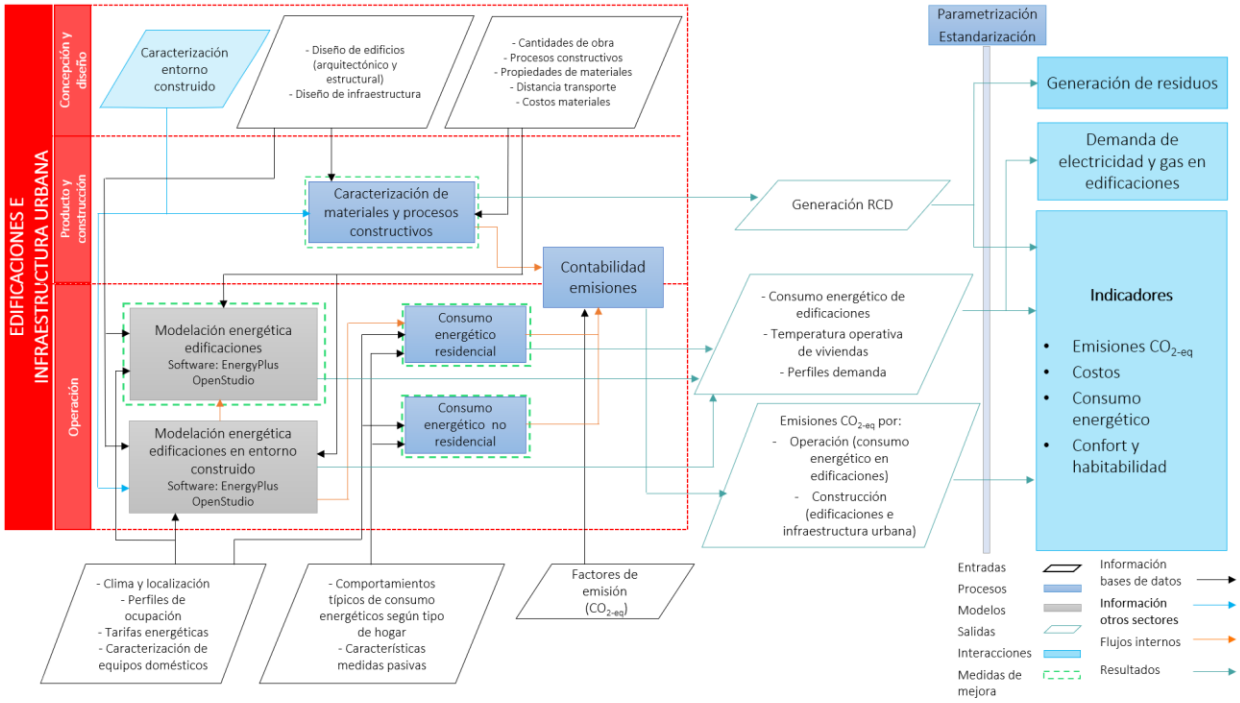


Figura 14: Modelo sectorial Edificaciones e infraestructura urbana

Por otro lado, para la fase de operación se desarrollan simulaciones de edificaciones con el objetivo de analizar el consumo energético y las condiciones de temperatura operativa de la edificación aislada y su interacción con el entorno construido. Adicionalmente, en este punto se complementan las simulaciones con una estimación de consumo energético de la operación de equipos domésticos para obtener el consumo

y emisiones asociadas al sector residencial. De la misma forma, se realiza una caracterización para los edificios no residenciales y se obtienen los mismos parámetros de salida.

3.3. Herramienta de integración para las opciones de mitigación

Se propone una herramienta en Excel con el objetivo de organizar las medidas de mitigación definidas por cada sector y analizar diferentes escenarios de mitigación y adaptación. El resultado de su implementación corresponde a un conjunto de escenarios para el periodo analizado, los cuales se construyen a partir de la agregación de medidas individualmente caracterizadas o de un paquete de medidas. Para la suma del abatimiento de cada medida se consideran las posibles interacciones y conflictos que pueden presentarse con el fin minimizar la incertidumbre sobre el abatimiento total de un conjunto de medidas implementadas. Por este motivo la herramienta se basa en la identificación y calificación de estas posibles interacciones. Por otro lado, el análisis sectorial de las emisiones y las medidas de mejora se realiza a partir de dos clasificaciones. Mediante la clasificación principal (ver Tabla 9) se diferencian sectores de actividad urbana y, mediante la clasificación alterna (ver

Tabla 10), se establece una clasificación acorde con lo propuesto por el IPCC.

Tabla 9. Clasificación principal

Sector	**Subsector**	**Clasificación medidas**
Ecología urbana	Cobertura del suelo	Restauración y consolidación de la infraestructura verde
Agua	Manejo de la escorrentía	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible
	Suministro de agua	Reducción de pérdidas
Energía	Generación de energía	Energías descarbonizadas
Residuos	Gestión de residuos	Aprovechamiento de residuos
		Recolección de residuos
		Disposición final de residuos
	Consumo de energía	Reemplazo de combustibles
Movilidad	Uso del suelo	Diseño urbano
		Infraestructura de transporte
	Consumo de energía	Cambios en los patrones de comportamiento
		Reemplazo de combustibles
Infraestructura urbana	Consumo de agua	Equipos eficientes
		Sistemas de reúso y aprovechamiento
	Consumo de energía	Cambios en los patrones de comportamiento
		Eficiencia energética
		Nuevas tecnologías
	Procesos constructivos	Materiales
		Técnica de construcción

Tabla 10. Clasificación alterna

Sector	**Subsector**
Energía	Producción de energía
	Demanda de energía
IPPU	IPPU
AFOLU	AFOLU
Residuos	Residuos sólidos
	Agua residual

Los parámetros generales que se ingresan son: población, área, año inicial y final, tasa de descuento, divisa utilizada (e.g., USD 2019), y año base cálculo valor presente. Se incluyen campos para adaptar el análisis

de las medidas de acuerdo con criterios particulares como el peso de los criterios para el análisis de factibilidad y adaptación, el valor máximo para las interacciones entre las medidas y la costo-eficiencia máxima, la cual será empleada para la definición de un escenario. Para cada medida y paquete[1] que se incluya en el análisis se debe suministrar la información presentada en la Tabla 11, para lo cual se selecciona la categoría principal y alternativa. A su vez, si la mitigación producto de la implementación de la medida afecta emisiones de varios sectores se deben indicar los sectores afectados. Esta información será empleada en el análisis sectorial de los escenarios para atribuir el abatimiento o emisiones adicionales a los sectores correspondientes. Adicionalmente, si para una medida se estableció el abatimiento en procesos que no tienen una relación directa con el área evaluada (e.g., mitigación de emisiones asociadas con la manufactura de productos por aprovechamiento de residuos), se disponen campos adicionales para señalar los sectores afectados de acuerdo con la clasificación alternativa e ingresar la mitigación correspondiente.

Por otro lado, se debe indicar si el objetivo principal de la medida es mitigación y/o adaptación, así como el nivel de incertidumbre asociado con la cuantificación del desempeño y costos. Para la calificación de la incertidumbre se consideran las fuentes de información y los procesos de emisión y captura de carbono que se incluyeron en el análisis de estas (ver

Tabla 12). Los efectos de la medida se evalúan en torno a mitigación, adaptación y otros beneficios. Por este motivo, la información a ingresar incluye el abatimiento en términos de $CO_{2\text{-eq}}$, cuatro indicadores para estimar la adaptación y la calificación de posibles cobeneficios en el sector social, económico y ambiental. Adicionalmente, para cada medida se califica la factibilidad y se ingresan costos y beneficios monetarios.

Tabla 11. Información requerida para las medidas y los paquetes de medidas

Información requerida		**Tipo de información**	**Observaciones**
Categorización		Sector/Subsector/Clasificación	Ver Tabla 9
Categorización alternativa (CA)		Sector/Subsector	Ver Tabla 10
Afectación de otros sectores		Sectores afectados	
Afectación de otros sectores CA		Sectores afectados	
Mitigación adicional CA		Sectores afectados	
Tipo		Mitigación/Adaptación	
Incertidumbre		Cualitativa	(1) Baja, (2) Media, (3) Alta, (4) Muy alta Ver Tabla 12
Abatimiento		Abatimiento anual (Ton $CO_{2\text{-eq}}$/año)	
		Abatimiento total (Ton $CO_{2\text{-eq}}$)	
Adaptación		Ahorro agua potable (m^3)	
		Reducción de temperatura superficial (°C)	
		Incremento en la evapotranspiración (%)	
		Escorrentía regulada (m^3)	
		Uso adicional de fuentes alternativas de agua (m^3)	
Cobeneficios/ Otros beneficios	Sociales	Cualitativa	- Muy positivo - Positivo - Neutro - Negativo - Muy negativo - No aplica
	Económicos		
	Ambientales		

[1] Un paquete de medidas corresponde a la agrupación de diferentes medidas de mitigación que deben ser analizadas en conjunto para no subestimar o sobreestimar su efecto en el abatimiento de GEI.

Información requerida		Tipo de información	Observaciones
Factibilidad	Financiera	Cualitativa	(1) Baja, (2) Media, (3) Alta Ver Tabla 13
	Técnica		
	Regulatoria		
Costos y beneficios monetarios		Costos iniciales (USD 2018)	
		Costos anuales (USD 2018/año)	
		Beneficios anuales (USD 2018/año)	

Tabla 12. Criterios para la evaluación de la incertidumbre

Calificación	Criterios	
	Fuentes de información	**Estimación de emisiones y abatimiento de $CO_{2\text{-eq}}$**
Muy alta	El desempeño y los costos se cuantificaron con información secundaria proveniente de casos de estudios en otros países o zonas con distintas características socioeconómicas.	Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Alta	El desempeño y los costos se cuantificaron con información secundaria proveniente de casos de estudios en otros países o zonas con distintas características socioeconómicas.	La mayoría de los procesos de emisión y captura de carbono son considerados a través de los modelos empleados
Media	El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país.	Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Baja	El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria.	La mayoría de los procesos de emisión y captura de carbono son considerados a través de los modelos empleados

En referencia a la adaptación al cambio climático, se incluyen cinco indicadores para analizar cuantitativamente la contribución de las medidas propuestas a incrementar la resiliencia frente a posibles problemas de desabastecimiento, inundaciones e incremento de la temperatura. De esta manera, se incluye el ahorro de agua potable y el uso adicional de fuentes alternativas de agua durante el periodo analizado, así como la reducción estimada del volumen de escorrentía durante este periodo. En cuanto a la temperatura, se puede reportar de manera directa el efecto relacionado con la adaptación como una reducción esperada de la temperatura superficial o indirecta, a partir del incremento porcentual estimado en la evapotranspiración del área. Se presentan estas dos opciones debido a que el análisis de la temperatura depende de la información disponible y del efecto que se pueda cuantificar en una medida planteada. Por ejemplo, un análisis de coberturas a partir de información de sensores remotos permite estimar la temperatura superficial. Pero una evaluación de este tipo puede ser insuficiente para cuantificar el efecto de estrategias como los SUDS. En ese caso, se requiere evaluar el efecto del cambio de la cobertura y del manejo de la escorrentía, ya que esto incide en el agua superficial o subsuperficial almacenada; lo cual permite reducir la temperatura en el área circundante.

En la herramienta se incluye el análisis cualitativo de cobeneficios u otros beneficios considerando que no todos los beneficios de la implementación de una medida pueden ser evaluados en términos monetarios. En este caso se identifican tres categorías, correspondientes a beneficios sociales, económicos y ambientales. A su vez, se incluyen beneficios que se consideran relevantes dada la escala de implementación de las medidas. La evaluación de los beneficios sociales incluye el impacto sobre el empleo, la pobreza, la salud, la educación, la seguridad alimentaria, la equidad y el confort. Para los beneficios económicos se considera el impacto sobre el crecimiento económico, la productiva y la oferta de recursos naturales. Los beneficios ambientales incluyen los impactos en la biodiversidad, ruido, suelo, calidad del aire y calidad del agua. El análisis sobre los cobeneficios incluidos puede establecerse a partir de distintos indicadores y traducirse en

términos cualitativos (p. ej., muy positivo o negativo). Por ejemplo, los impactos en la salud pueden analizarse a partir de la reducción de emisiones y el confort a partir de cambios de temperatura que favorecen el confort en las viviendas.

La valoración de la factibilidad se realiza a partir de cuatro tipos de factibilidad presentados en la Tabla 13. Para la factibilidad técnica, regulatoria y social, una calificación alta depende de la existencia de elementos en el contexto local que faciliten la implementación de la medida y contribuyan a su éxito. En cuanto a la factibilidad financiera, esta se centra en el costo por tonelada abatida. La calificación propuesta para factibilidad financiera debe revisarse si existen otras limitantes para la implementación como altos costos de inversión.

Tabla 13. Criterios para evaluación de factibilidad

Calificación	**Financiera**	**Técnica**	**Regulatoria**	**Social**
Alto	Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5 USD/ton)	Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.	Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación	La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población
Medio	Costo por tonelada reducida menor a 30 USD/ton	Existe experiencia previa en pilotos para su construcción y mantenimiento.	No es contrario a las leyes y regulaciones vigentes pero los trámites requeridos pueden dificultar su implementación	Puede tener una moderada/baja aceptación por parte de la población, pero no afecta su calidad de vida ni genera riesgos para la población
Bajo	Costo por tonelada reducida mayor a 30 USD/ton	Se requieren habilidades adicionales, conocimiento y experticia para su construcción y mantenimiento.	De acuerdo con la normativa vigente no es posible su implementación	Puede generar inequidad o afectar la calidad de vida y tener una baja aceptación por la población

El procedimiento para definir escenarios y cuantificar el abatimiento se resume en la Figura 15. En primer lugar, a partir del análisis de las relaciones y conflictos se establecen las acciones independientes y las acciones para las que se requieren paquetes. Dos medidas pueden presentar una relación de traslapo y/o refuerzo si involucran las mismas fuentes o sumideros de carbono [30]. En el caso de un traslapo la suma del efecto de implementar las medidas en conjunto es menor que la suma de implementar las medidas de manera separada. En contraste, si hay refuerzo el efecto combinado de implementar las medidas en conjunto es mayor. En la matriz de relaciones se comparan las medias y se asigna una calificación cualitativa de acuerdo con la intensidad del traslapo y/o refuerzo (ver Tabla 14). En la matriz de conflictos se señalan medidas que no pueden implementarse de manera simultánea.

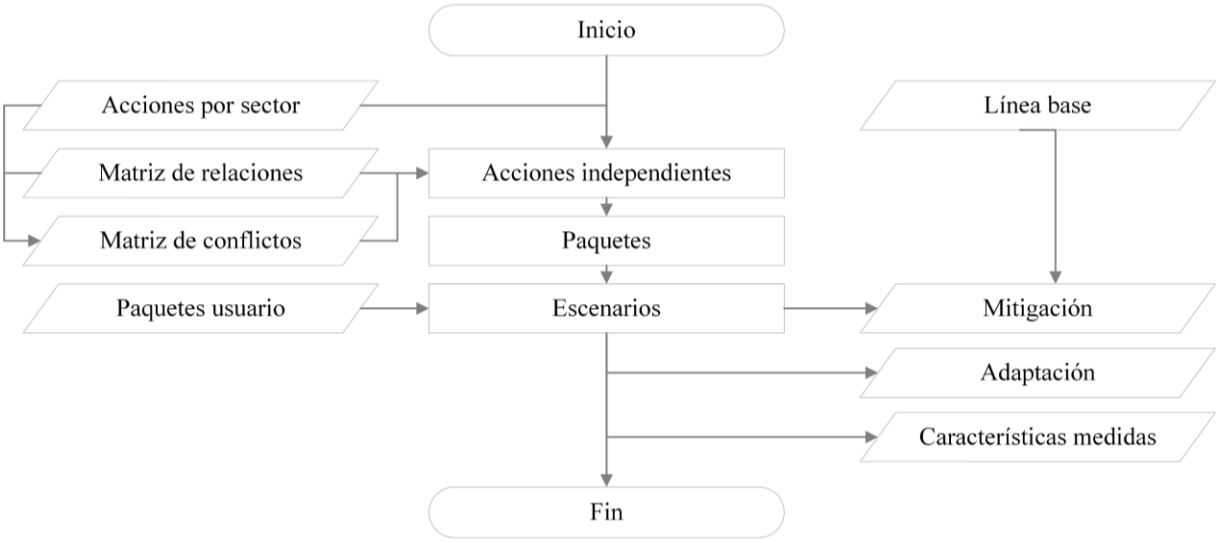


Figura 15. Análisis propuesto mediante la herramienta de integración

Tabla 14. Criterios para la matriz de relaciones

Calificación	**Traslapo**	**Refuerzo**	**Traslapo y refuerzo**
Alto	Todas las fuentes o sumideros de carbono afectados de forma directa por las medidas son iguales	La implementación de una medida tiene un efecto positivo, significativo y directo sobre el desempeño de la otra	El traslapo o el refuerzo es alto
Medio	Algunas fuentes o sumideros de carbono afectados de forma directa por las medidas son iguales	La implementación de una medida tiene un efecto positivo, significativo e indirecto sobre el desempeño de la otra	El traslapo o el refuerzo es medio
Bajo	Algunas fuentes o sumideros de carbono afectados de forma indirecta por las medidas son iguales	La implementación de una medida tiene un efecto positivo e indirecto sobre el desempeño de la otra	Tanto el traslapo como el refuerzo son bajos
Independiente	No afectan las mismas fuentes o sumideros de carbono (directa o indirectamente)		

Para los diferentes escenarios se selecciona un conjunto de medidas que no pertenezcan al mismo paquete y que no presenten conflictos. Se determinan cinco escenarios considerando: (1) mayor abatimiento, (2) menor costo por tonelada abatida, (3) mayor factibilidad, (4) mayor abatimiento con medidas cuya costo-eficiencia no sea mayor a un límite establecido, y (5) mayor adaptación. Adicionalmente, se establece un sexto escenario de mayor abatimiento a partir del análisis de los paquetes definidos por las características de las medidas y los paquetes establecidos de manera independiente por el usuario. Como resultado se estiman las emisiones para los distintos escenarios a partir de la línea base y la mitigación conjunta de las medidas. Para el conjunto de medidas analizadas se presenta su desempeño en cuanto a adaptación y cobeneficios. A su vez, se resumen las características de las medidas en referencia al tipo de medida predominante, la incertidumbre en la estimación del desempeño y la factibilidad de estas.

Referencias

[1] V. Masson, C. Marchadier, L. Adolphe, R. Aguejdad, P. Avner, M. Bonhomme, G. Bretagne, X. Briottet, B. Bueno, C. de Munck, D. Hallegatte, S. Hallegatte, J. Hidalgo, T. Houet, J. Le Bras, A. Lemonsu, N. Long, M. Moine, T. Morel, L. Nolorgues, G. Pigeon, J. Salagnac, V. Viguié and K.

Zibouche, "Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach," *Urban Climate*, pp. 407-429, 2014.

[2] P. Kristensen, "The DPSIR Framework," 2004.

[3] S. Robele, A. Newton and J. Icely, "A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems," *Ocean & Coastal Management*, pp. 63-77, 2015.

[4] N. T. Skoulikidis, "The environmental state of rivers in the Balkans—a review within the DPSIR framework," *Science of the Total Environment*, pp. 2501-2516, 2009.

[5] S. Sun, Y. Wang, J. Liu, H. Cai, P. Wu, G. Qingling and L. Xu, "Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework," *Journal of Hydrology*, pp. 140-148, 2016.

[6] M. O'Malley and B. Kroposki, "Unlocking felixibility: Energy Systems Integration [guest editorial]," *IEEE Power and Energy Magazine*, pp. 10-14, 2017.

[7] P. Mancarella, "MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models," *Energy*, pp. 1-17, 2014.

[8] D. Waughray, Water Security: the Water Food Energy Climate Nexus. The World Economic Forum Water Initiative., Washington: Island Press, 2011.

[9] T. Ding, L. Liang, K. Zhou, M. Yang and Y. Wei, "Water-energy nexus: The origin, development and prospect," *Ecological Modelling*, p. 108943, 2020.

[10] Bonn, "The Water, Energy and Food Security Nexus—solutions for the Green Economy.," 2011. [Online]. Available: https://www.water-energy-food.org/.

[11] A. Mukherji, "The energy-irrigation nexus and its impact on groundwater markets in eastern Indo-Gangetic basin: evidence from West Bengal, India," *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, p. 6413–6430, 2007.

[12] M. Bazilian, H. Rogner, M. Howells, S. Hermann, D. Arent, D. Gielen, P. Steduto, A. Mueller, P. Komor, R. Tol and K. Yumkella, "Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach," *Energy Policy*, vol. 39, no. 12, p. 7896–7906, 2011.

[13] A. A. L. Siddiqi, "The water-energy nexus in Middle East and North Africa," *Energy Policy* , vol. 39, no. 8, p. 4529–4540, 2011.

[14] C. Scott, S. Pierce, M. Pasqualetti, A. Jones, B. Montz and J. Hoover, "Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, p. 6622–6630, 2011.

[15] P. Zhang, L. Zhang, Y. Chang, M. Xu, Y. Hao, S. Liang, G. Liu, Z. Yang and C. Wang, "Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review," *Resources, Conservation {\&} Recycling*, vol. 142, pp. 215-224, 2019.

[16] K. Stave, "A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada," *J. Environ. Manage.*, vol. 67, p. 303–313, 2003.

[17] Y. Feng, S. Chen and L. Zhang, "System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: a case study of Beijing, China," *Ecol. Model*, vol. 252, p. 44–52, 2013.

[18] J. Halbe, C. Pahl-Wostl, M. Lange and C. Velonis, "Governance of transitions towards sustainable development-the water-energy-food nexus in Cyprus," vol. 40, p. 877–894, 2015.

[19] Y. Zhuang, "A System Dynamics Approach to Integrated Water and Energy Resources Management," University of South Florida, 2014.

[20] S. Chen and B. Chen, "Urban energy-water nexus: A network perspective," *Applied Energy*, pp. 905--914, 2016.

[21] B. Fath, "Distributed control in ecological networks," *Ecological Modelling*, pp. 235--245, 2004.

[22] F. Bullo, Lectures on Network Systems, 2019.

[23] The Intergovernmental Panel on Climate Change, "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelnes form National Greenhouse Gas Inventories," 2019.

[24] R. Sharp, R. Chaplin-Kramer, S. Wood, A. Guerry, H. Tallis and T. Ricketts, "InVEST User's Guide," 2018.

[25] Z. Kapelan and K. Behzadian, "Modelling metabolism based performance of an urban water system using WaterMet2," *Resources, Conserv. Recycl,* vol. 70, pp. 113-122, 2014.

[26] Z. Zhu, J. P. Rodríguez, M. Torres, J. Fontecha and J. Walteros, "A participatory approach based on stochastic optimization for the spatial allocation of Sustainable Urban Drainage Systems for rainwater harvesting," *Environmental Modelling & Software,* vol. 123, p. 104532, 2020.

[27] M. Arora and H. Malano, Urban Water Cycle Modelling and Management, MDPI, 2018.

[28] M. Espinosa Valderrama , A. Cadena Monroy and E. Behrentz, "Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector," *Energy Policy,* vol. 124, p. 111–122, 2019.

[29] H. Wang, X. Ou and X. Zhang, "Mode, technology, energy consumption, and resulting CO2 emissions in China's transport sector up to 2050," *Energy Policy,* vol. 109, p. 719–733, 2017.

[30] D. Rich, J. Finnegan, R. Owen-jones, A. García-guerrero, J. Dickinson and K.-k. Barth, "Policy and Action Standard," 2014.

[31] N. Quijano, C. Ocampo-Martinez, J. Barreiro-Gomez, G. Obando, A. Pantoja and E. Mojica-Nava, "The role of population games and evolutionary dynamics in distributed control systems: The advantages of evolutionary game theory," *IEEE Control Systems,* pp. 70-97, 2017.