

Modelo de economía circular para el sector de la construcción de Santiago de Cali

Circular economy model for the construction sector of Santiago de Cali

Autor: Aníbal Maury Ramírez

Resumen



Este artículo describe el modelo de economía circular propuesto para Santiago de Cali, el cual está principalmente orientado al análisis y uso eficiente de los materiales de construcción teniendo en cuenta la recuperación de los ecosistemas y el flujo circular de los materiales pétreos. Esta herramienta útil para el sector empresarial, gubernamental y la sociedad civil, incluye un análisis de la producción de materiales de construcción, proceso constructivo, uso y operación, y terminación del ciclo de vida de edificaciones e infraestructura. En particular, el modelo plantea estrategias concretas para el aprovechamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) soportadas en investigación aplicada (estudio de casos). Además, este modelo describe el sistema de gestión de RCD y algunas características del Parque Ambiental y Tecnológico, principal mecanismo de aprovechamiento de los RCD.

Palabras clave: economía circular, construcción, reciclaje, concreto, mortero, agregados, impacto ambiental, RCD.

Abstract



This article describes the circular economy model proposed for Santiago de Cali, which is mainly oriented to the analysis and efficient use of construction materials, taking into account the recovery of ecosystems and the circular flow of stony materials. This useful tool for the business sector, government and civil society, includes the analysis of the production of construction materials, construction process, use and operation, and completion of the life cycle of buildings and infrastructure. In particular, the model proposes specific strategies for the use of Construction and Demolition Waste (C&DW) supported on applied research (case studies). In addition, this model includes the C&DW management system and some characteristics of the Environmental and Technological Park, the main proposal for valorization of the C&DW.

Keywords: circular economy, construction, recycling, concrete, mortar, aggregates, environmental impact, C&DW.

Recibido / Received: 21 de Julio de 2021 Aprobado / Approved: 20 de Septiembre de 2021

Tipo de artículo / Type of paper: Artículo de Investigación

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad El Bosque

Autor para comunicaciones / Author communications: Aníbal Maury Ramírez, amaury@unbosque.edu.co

El Autor declara que no tiene conflicto de interés.

Introducción

El acelerado crecimiento de la población Colombiana y su desplazamiento a los centros urbanos en los últimos 50 años, ha estimulado indirectamente el desarrollo del sector de la construcción nacional, el cual representa uno de los sectores productivos más relevantes en la economía del Valle del Cauca y Santiago de Cali, potenciando gran cantidad de empleos (directos e indirectos) y dinamizando otros sub-sectores de la economía del Suroccidente Colombiano. De acuerdo a la Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol), en Colombia el sector de la construcción genera actualmente inversiones anuales por 77 billones de pesos, aporta 46 billones de pesos a la economía, demanda insumos por 34 billones de pesos anualmente y, junto con las actividades inmobiliarias, genera 1,8 millones de empleos (CAMACOL, 2018). Además, esta industria ha sido muy importante en la mejora de la infraestructura para la conectividad terrestre y aérea, el desarrollo del sector vivienda, el suministro de servicios públicos, hospitalarios, educativos, y el crecimiento de la actividad empresarial, turística y comercial de la región. Sin embargo, principalmente debido a la desarticulación de todos los actores dentro del sector construcción, la falta de control y el desconocimiento de los impactos ambientales por parte de todos los actores, se han generado serias problemáticas en el Valle del Cauca y particularmente en la ciudad de Santiago de Cali. Actualmente el deterioro ambiental de las siete cuencas hidrológicas de los ríos que cruzan la ciudad es significativo debido a la extracción de materias primas, esto particularmente ocasionado por la minería artesanal e ilegal. Asimismo, la disposición adecuada de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) se ha convertido en un gran desafío para la región. Diariamente en la ciudad de Santiago de Cali se generan aprox. 2500 m³ de escombros o RCD, ocupando uno de los primeros lugares entre las capitales colombianas en la generación de este tipo de residuos (Plan de Ordenamiento Territorial de Alcaldía Santiago

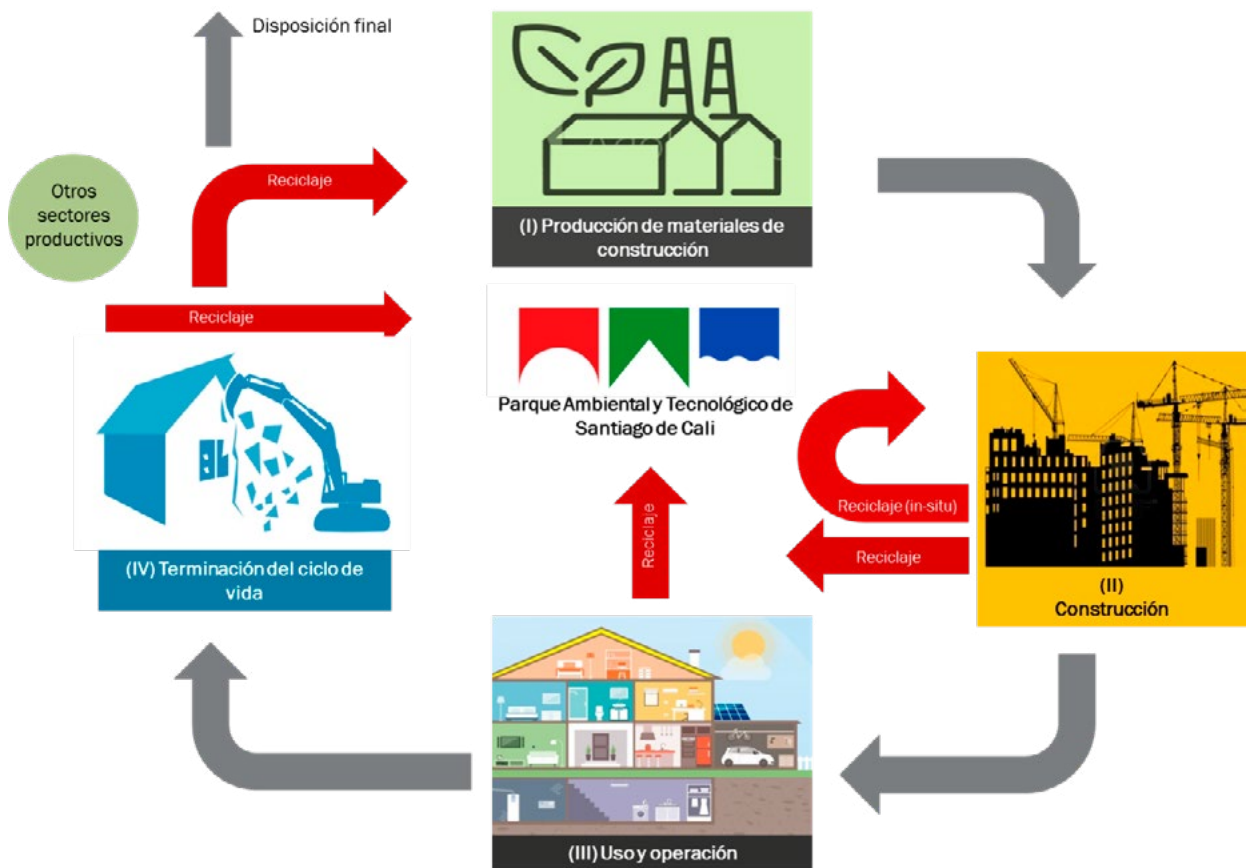
de Cali, 2014). Para enfrentar este reto, por su costo y magnitud, se destacan los trabajos realizados por la Alcaldía de Santiago de Cali para la descolmatación de la Estación de Transferencia (EDT) de la Carrera 50 y las labores de limpieza del jarillón del río Cauca.

Por lo anterior y con el ánimo de mejorar esta situación, el Modelo de Economía Circular para el Sector Construcción de Santiago de Cali busca la transformación del sector de la construcción de un modelo lineal, (extracción, producción, consumo y desecho) a un modelo de economía circular. Aunque existen diversas interpretaciones del concepto de circularidad en la economía, el modelo propuesto apropia la economía circular como un sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales a través de la implementación de innovaciones tecnológicas, alianzas y colaboraciones entre los actores, y el impulso de modelos de negocio que respondan a los fundamentos del desarrollo sostenible (DANE, 2020).

Conceptualización del Modelo de Economía Circular

Con el ánimo de desarrollar el sector de la construcción en armonía con el medio ambiente y la sociedad, la transformación de un modelo económico lineal desarticulado (extracción, producción, consumo y desecho) a un modelo económico circular resulta una imperante necesidad. En particular el Modelo de Economía Circular está compuesto por cuatro macroprocesos que son: (I) Producción de Materiales de Construcción, (II) Proceso Constructivo, (III) Uso y operación y (IV) Terminación del Ciclo de Vida de Edificaciones e Infraestructura. Asimismo, el modelo incluye la articulación con otros sectores productivos que generan residuos de interés para el sector construcción, estrategia conocida como simbiosis industrial (Figura 1).

Figura 1. Modelo de Economía Circular del Sector de la Construcción para Santiago de Cali compuesto por los macroprocesos de producción de materiales de construcción, proceso constructivo, uso y operación, y terminación del ciclo de vida de edificaciones e infraestructura (Bravo German A.M. et al., 2020).



Además, en el Modelo de Economía Circular se destaca la articulación de todas las etapas con el Parque Ambiental y Tecnológico de Santiago de Cali, lugar concebido como aquel espacio físico que cuenta con infraestructura y capital humano compartido que ahorra inversiones a las empresas y emprendimientos, las que, al estar insertas en agrupamientos flexibles, encuentran un soporte (in-situ y en el parque) para principalmente transformar RCD y otros residuos en materiales sostenibles para la construcción. A continuación se describe el portafolio completo de servicios que potencialmente podría ofrecer el Parque para cada una de las fases del modelo:

- a. Certificación y consultoría para el desarrollo de procesos productivos limpios en la industria de los materiales de construcción.
- b. Desarrollo y certificación de planes de manejo de RCD en obras para grandes y pequeños generadores.
- c. Desarrollo de tecnologías para el uso eficiente del agua y la energía en edificaciones, así como el manejo de residuos sólidos, y residuos de construcción y demolición.
- d. Certificación de materiales de construcción sostenibles. Se destacan los materiales para cubiertas, acabados, fachadas y estructuras complementarias (e.g. madera, metales, cerámicos, pinturas).
- e. Desarrollo de materiales de construcción sostenibles que incorporan volúmenes óptimos de RCD y otros residuos, garantizando su resistencia mecánica, durabilidad, bajo impacto ambiental y beneficiando comunidades vulnerables.

El modelo de economía circular propuesto se soporta conceptualmente en la Estrategia Nacional de Economía Circular del Gobierno Nacional, iniciativa creada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, y donde también participan otras entidades del orden nacional y regional, particularmente la Alcaldía de Santiago de Cali. En esta estrategia nacional se plantean mecanismos de gestión y política pública a partir de los cuales las entidades del Estado facilitan la transformación hacia la economía circular: (a) innovación en mecanismos normativos que impulsan a empresas y nuevos emprendimientos a cambiar sus sistemas de producción y superan barreras para el cambio, (b) la gestión de incentivos que promuevan procesos de transformación de sistemas industriales y agrícolas a través de apoyos en capacitación y asistencia técnica, (c) la promoción de la investigación, la innovación y la generación de conocimiento, (d) la cooperación internacional que facilita la transferencia de tecnología y experiencias de otros países, y (e) el desarrollo de un sistema de información sobre economía circular para el seguimiento a la implementación de la estrategia y la medición del avance del país en la materia, a partir de datos y estadísticas científicas y técnicas. Además de estos mecanismos de política pública y gestión, se enfatizan, a partir del diagnóstico del metabolismo de la economía colombiana, seis líneas de acción: (a) flujo de materiales industriales y productos de consumo masivo (b) flujos de materiales de envases y empaques; (c) flujos de biomasa; (d) fuentes y flujos de energía, (e) flujo del agua; y (f) flujos de materiales de construcción (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2019).

Por lo anterior, y en función de los problemas ambientales, sociales y oportunidades de desarrollo, el modelo de economía circular propuesto para Santiago de Cali considera prioritarios los flujos de materiales de construcción, flujo del agua, fuentes y flujos de energía durante los macroprocesos de producción de materiales, construcción, uso y operación, y terminación del primer ciclo de vida de edificaciones e infraestructura. A continuación se describen cada uno de los macroprocesos planteados:

1. Producción de materiales de construcción

La producción de materiales de construcción está compuesta por las fases de extracción de materias primas

y su respectivo procesamiento. Sin embargo, considerando los graves impactos ambientales y sociales de estas dos fases, en el modelo de economía circular se plantea la incorporación de los conceptos de extracción de activos ambientales y producción limpia como reemplazo a la mirada clásica de producción de materiales de construcción. En el marco de la economía ecológica, los activos ambientales están asociados a los servicios ecosistémicos, recursos o procesos de los ecosistemas naturales (bienes y servicios) que benefician a los seres humanos. Incluye productos como agua potable y aire limpio, y procesos tales como la descomposición de residuos. Con base en la anterior premisa, la valoración de los activos ambientales está directamente relacionada con la economía, sociología y biología, y se utiliza principalmente en el marco legal y de derechos de la naturaleza, así como en la responsabilidad ambiental humana de disminuir, al máximo esfuerzo y potencial, la huella ecológica en cualquier actividad realizada.

Por otro lado, la producción limpia busca la conservación de las materias primas, el agua y la energía, la reducción de materias primas tóxicas, emisiones y de residuos, que van al agua, a la atmósfera y al entorno. La producción limpia surge desde la ingeniería de procesos como resultado de la filosofía del mejoramiento continuo, del control de calidad y de la reingeniería, y consiste en la revisión de las operaciones y procesos unitarios que forman parte de una actividad productiva o de servicios, con miras a encontrar las diversas posibilidades de mejoramiento u optimización en el uso de los recursos. La producción limpia es definida como una estrategia de gestión empresarial preventiva aplicada a productos, procesos y organización del trabajo, cuyo objetivo es minimizar emisiones y descargas en la fuente, reduciendo riesgos para la salud humana y ambiental, y elevando simultáneamente la competitividad. Ello resulta de las siguientes acciones: (a) minimización y consumo eficiente de insumos, agua y energía; (b) la minimización del uso de insumos tóxicos; (c) minimización del volumen y toxicidad de todas las emisiones que genere el proceso productivo; (d) reciclaje de la máxima proporción de residuos en la planta y fuera de ella; (e) y la reducción del impacto ambiental de los productos en su ciclo de vida.

Con el ánimo de articularse a los anteriores principios, la *Portland Cement Association (PCA)*, uno de los más

importantes y antiguos gremios productivos de los Estados Unidos, ha creado el *Concrete Sustainability Hub*, un centro de investigación vinculado al *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* y la *Ready Mixed Concrete (RMC)*. El Hub se fundó con la misión de acelerar los avances emergentes en la ciencia y tecnología del concreto y transferir los mejores resultados disponibles a las prácticas de ingeniería. El equipo interdisciplinario de investigadores reúne a líderes de la academia, la industria y el gobierno para facilitar la transferencia de conocimiento al alinear la investigación líder en el mundo con las necesidades del usuario final. Por tanto, los investigadores del Hub están investigando el concreto desde la nanoescala para abordar la sostenibilidad y las implicaciones ambientales de la producción y el uso del material. Su investigación también tiene como objetivo afinar la composición del concreto, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción y cuantificar su impacto ambiental y su costo durante toda la vida útil de una infraestructura o proyecto de construcción (PCA, 2020).

Iniciativas como la anterior han tenido un gran impacto en la industria cementera mundial, por lo que en Colombia, muchas compañías productoras de concreto y cemento están ampliando su portafolio de productos sostenibles con base en la reducción de consumos de energía y agua durante la producción. Otros grupos de materiales del sector construcción vienen realizando esfuerzos importantes pero mucho menos articulados y sistemáticos que los desarrollados por la industria del cemento, concreto y acero, principales materiales de construcción en los sistemas estructurales usados en Colombia.

2. Construcción de edificaciones e infraestructura

La construcción de una edificación o infraestructura es el macroproceso de materialización de los proyectos arquitectónicos e ingeniería (e.g. estructural, hidráulico, sanitario, eléctrico y redes de telecomunicaciones), y surge como respuesta a un conjunto de necesidades globales que el proyecto debe satisfacer en el uso u operación. Sin embargo, para lograr el objetivo anterior se requiere desarrollar las fases de coordinación previa, simultánea y el seguimiento al proyecto ejecutado. En particular, estas fases buscan la formulación y desarrollo de técnicas constructivas que permitan garantizar los consumos óptimos de agua, energía y materiales, así

como la emisión mínima de material particulado, gases y la generación de ruido. Lo anterior no solo permite desarrollar los principios de la construcción sostenible, sino que además minimiza los riesgos laborales, reduce costos y mejora la calidad en las obras.

Considerando la gran cantidad de proyectos y profesionales especialistas que intervienen en la fase de construcción de una edificación o infraestructura, resulta de gran importancia definir una metodología para el desarrollo de un proyecto. En este sentido, resultan valiosas las etapas propuestas por Muñoz Muñoz H.A. (2015) en su obra *Construcción, Interventoría y Supervisión Técnica de las Edificaciones de Concreto Estructural* según el Reglamento Colombiano NSR-10 (Muñoz Muñoz H.A., 2015).

- a. **Coordinación previa:** se refiere a la comprensión del proyecto arquitectónico cuando este aún no se encuentra definido y solo se establecen los criterios señalados por su diseñador. Se tratan de establecer alternativas sobre el sistema estructural, tipo de cimentación, eventual localización de pantallas, magnitud de la separación de las columnas y dimensiones, peralte o altura de las placas, características de los materiales probables, entre otros aspectos.
- b. **Coordinación simultánea:** a medida que avanzan las definiciones tanto arquitectónica como estructural de estos proyectos, se comparte el conocimiento entre los profesionales del diseño y se establece de forma simultánea, la incidencia de las definiciones que se derivan del dimensionamiento de los elementos estructurales o aspectos propios que la arquitectura propone como base conceptual del proyecto.
- c. **Coordinación de seguimiento posterior al proyecto ejecutado:** no es al final la mejor oportunidad para ejecutar tal labor, puesto que no solo se pierde la oportunidad de aprovechar los criterios técnicos que pueden aportar soluciones de buena confección y bajo costo, sino que el proyecto ya desarrollado tendrá que ser ajustado por la incidencia de los elementos estructurales que puedan surgir, hasta el punto que muchas veces puede llegar a afectarse la arquitectura que requiere replanteamientos de gran incidencia con la consiguiente pérdida de tiempo y esfuerzos.

En este sentido, para facilitar el desarrollo de la metodología propuesta bajo los principios de construcción sostenible, se requiere del uso de herramientas tecnológicas que faciliten el trabajo interdisciplinar y simultáneo para la ejecución de los proyectos arquitectónicos y de ingeniería. Por ejemplo, el *Building Information Modeling* (BIM) es una metodología de trabajo colaborativo aplicada al sector de la construcción, una colección de datos organizados de un edificio para facilitar la gestión de proyectos de ingeniería, arquitectura y construcción consiguiendo mejoras en el resultado y eficacia en los procesos. Todos los profesionales implicados en un proyecto de construcción pueden trabajar sobre un único proyecto en tiempo real con acceso a la misma información. BIM está asociado tanto a la geometría, a la relación con el sitio, a la información geográfica, a las cantidades y las propiedades de los componentes de un edificio o infraestructura. Por ejemplo, detalles de fabricantes de puertas o datos energéticos de un material se pueden consultar fácilmente en cualquier etapa del proyecto. En general, BIM puede ser utilizado para brindar información de una edificación o infraestructura en cualquier momento. Por ejemplo, el avance en el proyecto estructural, actividades de mantenimiento e incluso a los procesos de rehabilitación y demolición. Cantidades de materiales y propiedades compartidas pueden ser extraídas fácilmente. Además, aspectos laborales, detalles de componentes y secuencias de actividades de construcción pueden ser aislados y definidos. Los software BIM son capaces de lograr dichas mejoras por medio de representaciones gráficas de las partes y los componentes que están siendo utilizados en la construcción de una edificación o infraestructura.

De igual modo, aunque la modularización y prefabricación son tecnologías que se han utilizado durante siglos en la industria de la construcción, su reaparición como nueva tendencia está asociada al ascenso de BIM y los requerimientos de la construcción sostenible. En particular, la modularización hace referencia al proceso de fabricación de unidades funcionales en ambientes controlados fuera de obra, de tal manera que estos puedan ser transportados en piezas enteras desde su lugar de fabricación hasta su ubicación final. Por su parte, los prefabricados son elementos estructurales (e.g. vigas, columnas, pórticos) y no estructurales (e.g. adoquines, bordillos, andenes) que conforman las

unidades funcionales (e.g. sistema estructural, cimentación). Los beneficios de utilizar los prefabricados y la modularización en la construcción incluyen ahorros en los calendarios de los proyectos, reducción de imprevistos, optimización de costos por personal y materiales, seguridad, calidad, minimización de RCD, y potencial de reutilización de módulos y prefabricados al final del ciclo de vida de edificaciones e infraestructura.

Recientemente, la robotización y la impresión 3D han surgido como tecnologías que buscan articular la industria de la construcción a las demandas de la sostenibilidad ambiental, económica y social. En particular la impresión 3D es la fabricación de elementos estructurales y no estructurales mediante la superposición de capas de material, tal como ocurre en la impresión sobre papel. Aun con importantes retos, la impresión 3D ya se ha aplicado a la construcción de casas, puentes peatonales y canales en Europa y Asia.

3. Uso y operación de edificaciones e infraestructura

Aunque pareciera que las edificaciones y proyectos de infraestructura durante su operación y uso no tuviesen mucho impacto ambiental, lo cierto es que los consumos de agua y energía, así como la generación y manejo de residuos sólidos, se constituyen en una problemática seria para la sostenibilidad del planeta (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015). Recientemente, esta problemática se agudiza aún más por el incremento de los tiempos de uso y operación de edificaciones residenciales debido a las cuarentenas para evitar la propagación del COVID-19, las contingencias ambientales asociadas a la mala calidad del aire urbano, e incluso debido a las protestas sociales que han convertido los hogares en lugares de trabajo y ocio. Por lo anterior, el uso y consumo responsable se convierten en un nuevo paradigma de estilo vida para la sociedad. El consumo responsable es un concepto defendido por organizaciones ecológicas, sociales y políticas que consideran que la humanidad haría bien en cambiar sus hábitos de consumo ajustándolos a sus necesidades reales y optando en el mercado por bienes y servicios que favorezcan la conservación del medio ambiente, la igualdad social y el bienestar de las clases menos favorecidas. El consumo responsable es una manera de consumir bienes y servicios teniendo en cuenta, además de las variables de precio y calidad, las características sociales y laborales del entorno de producción y las consecuencias medioam-

bientales posteriores. Por lo anterior, este modelo no solo incorpora herramientas tecnológicas para el manejo y aprovechamiento de RCD, uso eficiente de la energía y agua en edificaciones e infraestructura, sino que además se constituye en una herramienta de formación para los usuarios de edificaciones e infraestructura en la búsqueda de estilos de vida sostenibles.

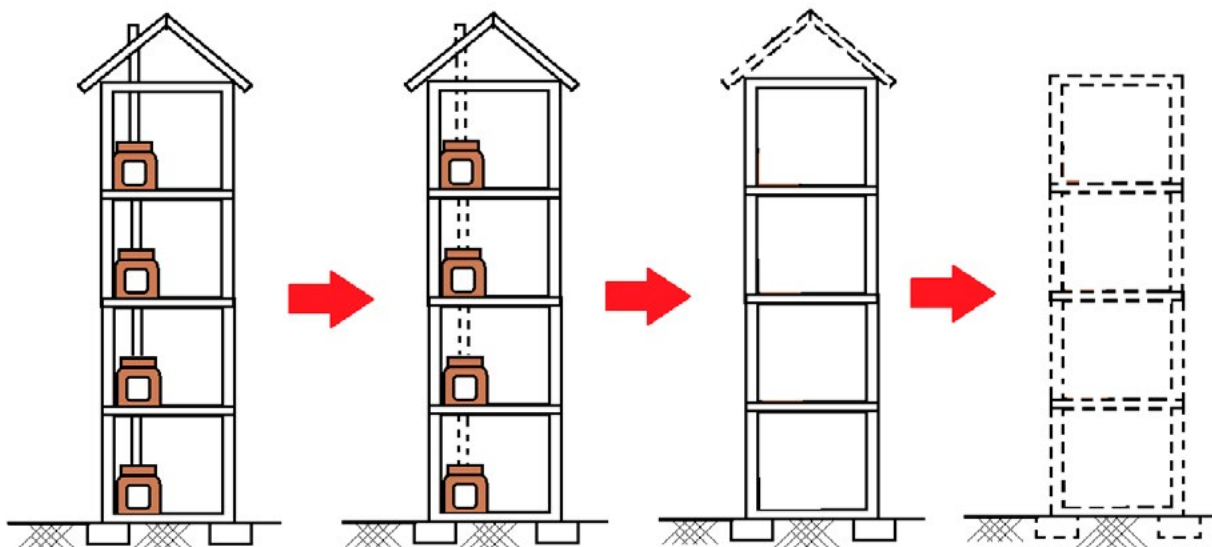
4. Terminación del ciclo de vida de edificaciones e infraestructura

Debido a que las edificaciones y la infraestructura están expuestas, no solamente a la acción mecánica de las cargas de servicio; sino también, a otros factores, por ejemplo ambientales, que tienden a deteriorarlas y destruirlas (i.e. acciones físicas, químicas y biológicas), se producen afectaciones que llevan a la terminación del ciclo de vida de las mismas (Sánchez De Guzmán D., 2011). Por lo anterior, y dependiendo del nivel de daño y recursos económicos, se priorizan las actividades de mantenimiento, reparación, rehabilitación y repotenciación antes que la demolición de una edificación o infraestructura. Se priorizan las mencionadas actividades porque con su relativo bajo costo e impacto ambiental, tienen el potencial de incrementar significativamente la vida útil de una edificación e infraestructura. Lo anterior resulta particularmente útil en los centros urbanos donde además se logra la conservación del patrimonio arquitectónico e histórico de las ciudades. De hecho, la anterior premisa plantea la necesidad de incorporar la flexibilidad arquitectónica o arquitectura transformable en el diseño de las edificaciones e infraestructura. La historia de las civilizaciones ha mostrado la importancia de replantear el uso de las edificaciones e infraestructura. Este principio ha sido fundamental para la solución de problemas que van desde la alimentación y el cobijo de la intemperie, hasta la logística del campo de batalla. Recientemente, la flexibilidad se ha utilizado en estructuras experimentales y ligeras para la organización de eventos y ocio, así como para instituciones, comercio y vivienda. En particular el diseño arquitectónico flexible tiene como objetivo principal la

adaptación y el cambio a las necesidades del usuario y el entorno. Posición contraria a la del diseño arquitectónico tradicional, que en mayor medida se encuentra fijo o estático hacia las necesidades del hombre. Así pues, la arquitectura flexible se rediseña con el tiempo ya que posee factores que le permiten desarrollar, eliminar, modificar partes de ella, manteniendo la estructura en constante servicio. Los beneficios del diseño arquitectónico flexible incluyen bajo costo, menor impacto ambiental, mayor campo creativo, pero sobretodo permite el desarrollo de una arquitectura de transición y búsqueda de soluciones ingeniosas en momentos de necesidad y escasez como el que vive la humanidad actualmente (Pinto Campos B.C., 2019).

Sin embargo, en los casos que luego de un profundo análisis se encuentre que resulta necesaria la demolición total o parcial de una edificación o infraestructura, el proceso debe hacerse respetando el ambiente y la sociedad. Por lo que resulta imperante plantear la demolición como el proceso opuesto a la construcción y que incluye operaciones secuenciales bien diseñadas. Esta conceptualización del proceso de demolición también es hoy conocida como la deconstrucción (Figura 2). En el marco del proceso de deconstrucción, la demolición selectiva se ha convertido en una técnica de gran utilidad para el aprovechamiento de los RCD. Esta técnica de demolición tiene como objetivo principal mejorar las condiciones de clasificación y aprovechamiento en la fuente, extendiendo el ciclo de vida de los materiales de construcción, favoreciendo la reutilización, generando menos residuos cuyo destino final será la disposición final. La técnica que tiene implicaciones importantes en costo y tiempo está compuesta por el desmonte de los acabados arquitectónicos (e.g. pisos, ventanas, puertas), seguido de los sistemas de mecánicos, calefacción, refrigeración y servicios públicos, y finalmente la demolición de la estructura, empezando por la superestructura y luego la cimentación, estos últimos residuos de difícil aprovechamiento por su exposición continua a aguas freáticas y minerales del suelo.

Figura 2. Secuencia del proceso de deconstrucción (modificado de Pacheco Torgal F. & Jalali S., 2011).



Parque Ambiental y Tecnológico

El Parque Ambiental y Tecnológico de Santiago de Cali es una iniciativa de carácter público y privada que contará con recurso humano altamente capacitado y una tecnología modular y flexible para la investigación, desarrollo e innovación de un novedoso portafolio de materiales de construcción que utiliza altos volúmenes de RCD y otros residuos (simbiosis industrial), garantizando el flujo de materiales pétreos en el sector construcción de Santiago de Cali. Por lo anterior, además de la tecnología requerida para la producción del portafolio de productos, se incluye en un laboratorio de materiales para la adecuada caracterización física, química, mecánica, durabilidad, e impacto ambiental de los productos desarrollados. Este laboratorio estará articulado a la red de laboratorios de universidades de la región quienes cuentan con amplia experiencia en el tema.

Vale destacar que el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición se desarrolla bajo el principio de las 7R (Repensar, Rediseñar, Reusar, Reparar, Remanufacturar, Reciclar y Recuperar), una iniciativa sobre hábitos de consumo, promocionada inicialmente por Greenpeace como 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar), que busca incentivar hábitos como el consumo respon-

sable. Este concepto hace referencia a estrategias para el manejo de residuos que buscan ser más responsables con el medio ambiente, y dando prioridad a la reducción en el volumen de residuos generados antes que la reutilización y reciclaje, procesos que generalmente consumen más energía y por ende tienen un mayor impacto ambiental y económico. Sin embargo, dado que en Santiago de Cali se generan aproximadamente 2600 m³/día de RCD con un porcentaje del 96% aprovechable por su naturaleza cerámica (ACODAL, 2017), este modelo ofrece herramientas específicas para el reciclaje en obra (in-situ) y en el Parque Ambiental y Tecnológico.

El reciclaje es concebido como un proceso amigable con el medio ambiente que busca convertir los residuos de construcción y demolición en nuevos productos para su posterior utilización dentro del sector construcción y otros sectores de la economía regional. Gracias al reciclaje se previene el desuso de materiales potencialmente útiles que terminarían dispuestos normalmente de forma inadecuada, o dispuestos con altos costos, y se reduce el consumo de nueva materia prima para la fabricación de materiales de construcción.

De acuerdo a ACODAL (2017), los sistemas constructivos predominantes en Santiago de Cali son la mampostería confinada con pórticos (46.4%), prefa-

bricados industrializados (27.2%), mampostería estructural (22.4%) y otros sistemas (4%). Lo cual demanda grandes cantidades de agregados triturados, arena de río, cemento gris, roca muerta (tierra de excavación), cerámica cocida y acero (Tabla 1). En todos los casos para cualquier sistema constructivo analizado,

estos materiales suman más del 99% del consumo total. Lo anterior significa que estos materiales representan, en peso, los principales componentes de una edificación de cualquier tipo de sistema constructivo, siendo estas estructuras similares entre sí, independientes de su localización en la ciudad.

Tabla 1. Consumo de materiales de construcción según sistema constructivo de Santiago de Cali (ACODAL, 2017).

Materiales	Industrializado (Kg/m ² -%)	Mampostería Estructural (Kg/m ² -%)	Mampostería Confinada-Pórticos (Kg/m ² -%)
Agregados triturados	542,19-42,7	404,05-29,3	624,99-26,0
Arena de Río	445,21-35,1	349,09-25,3	733,63-30,5
Cemento gris	156,74-12,4	138,78-10,1	306,12-12,7
Roca muerta-Tierra de excavación	46,60-3,7	152,24-11,0	372,52-15,4
Cerámica cocida	39,98-3,2	301,28-21,9	358,08-14,9
Acero	26,68-2,1	20,31-1,5	9,44-0,4
Madera	5,02-0,40	3,58-0,26	0,13-0,0
Teja de fibro-cemento	3,15-0,25	5,92-0,43	-
PVC	2,35-0,19	2,06-0,15	2,39-0,1
Cobre	0,42-0,03	0,13-0,01	-
Cemento blanco	0,37-0,03	0,48-0,03	-
Pinturas	0,32-0,03	0,55-0,04	-

Por lo anterior, con el ánimo de satisfacer la demanda de los anteriores materiales de construcción, garantizado sus propiedades mecánicas y durabilidad junto con la reducción significativa del impacto ambiental, el Modelo de Economía Circular mediante el Parque Ambiental y Tecnológico presenta la siguiente familia de productos:

a. Agregados reciclados o eco-agregados

Además del uso masivo y tradicional de agregados en el concreto y mortero, los agregados son recientemente utilizados para la generación de superficies permeables, superficies vegetadas (cubiertas y muros verdes), y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Los eco-agregados o agregados reciclados son materiales granulares con propiedades físicas, químicas y mecánicas que cumplen con las condiciones de resistencia mecánica y durabilidad para las diferentes aplicaciones descritas.

b. Eco-concretos y morteros

El concreto y mortero son los materiales de construcción más utilizados en el sector de la construcción regional, nacional y mundial. Los eco-concretos buscan el reemplazo de los componentes más importantes del concreto tradicional como los agregados (finos y gruesos) y cemento portland por agregados reciclados y cementantes suplementarios como las cenizas y escorias, estos últimos sub-productos de otros sectores productivos como las termoeléctricas y la agroindustria. Los eco-concretos y morteros podrán ser utilizados en edificaciones e infraestructura cuando se cumpla con las condiciones de resistencia mecánica y durabilidad establecidas en la normatividad colombiana.

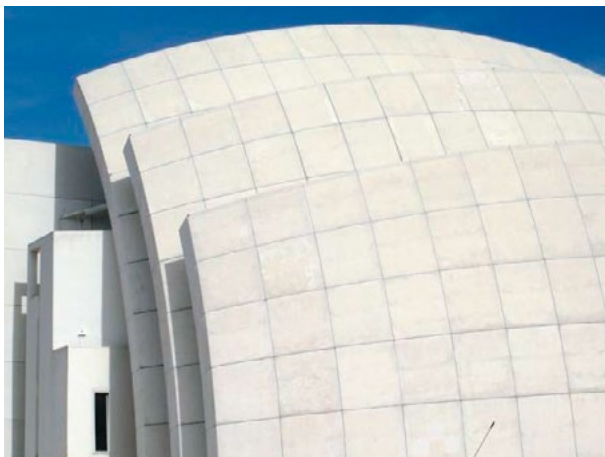
c. Eco-prefabricados y módulos

Estos elementos pertenecen a sistemas de construcción basados en el diseño y producción de componentes y subsistemas elaborados en serie en una fábrica fuera de su ubicación final y que se llevan a su posición definitiva para montar la edificación o infraestructura tras una fase de montaje relativamente simple y preciso. Los eco-prefabricados propuestos en este manual incluyen elementos estructurales (e.g. vigas, columnas losas, pórticos) como elementos no estructurales (e.g. bloques, adoquines, cunetas, bordillos y andenes).

d. Materiales de construcción inteligentes

Son materiales activos y adaptativos que tienen la capacidad de responder de manera autónoma, útil y controlada a cambios en su condición o en el entorno al que están expuestos. Se destacan los concretos y morteros auto-limpiantes y con capacidad de purificar el aire circundante. Estos materiales incorporando nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y utilizando la energía solar (fracción UV-A) pueden generar un proceso fotocatalítico de degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en fase sólida como en fase gaseosa. Han sido utilizados en edificaciones e infraestructura (Figura 3).

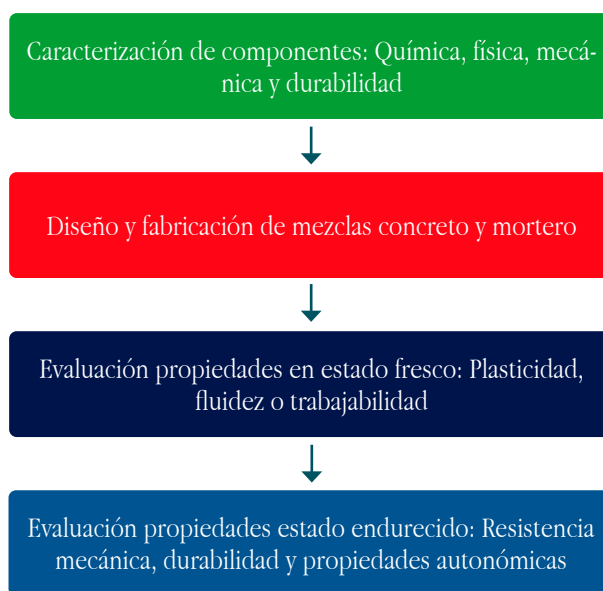
Figura 3. Edificaciones e infraestructura con concretos y morteros con capacidad de auto-limpieza y purificación del aire (Maury Ramírez A., 2011).



Por otra parte, vale destacar que el portafolio de productos estará diseñado y fabricado en función del tipo de RCD, cenizas y escorias disponibles, así como la resistencia mecánica y durabilidad requeridas dentro de la edificación o infraestructura. Por lo anterior, el diseño de los productos demanda un alto componente de investigación e innovación. Para lograr lo anterior, se desarrollan primero la fase de caracterización física, química, y mecánica de cada uno de los componentes de mezcla, destacándose la caracterización de los agregados provenientes de RCD, cenizas, escorias, y por ejemplo, nuevos componentes como los nanomateriales. Con base en esta información y utilizando los métodos de diseño de mezcla reconocidos, se procede a realizar el diseño

y fabricación de mezclas de prueba. Posteriormente, se realiza la evaluación de las propiedades en estado fresco de las mezclas de prueba mediante ensayos de consistencia, plasticidad o fluidez. Cuando dichas mezclas satisfacen las condiciones de colocación del producto para concretos y morteros fundidos in-situ, o para productos prefabricados, se procede a realizar la evaluación mecánica y durabilidad en el estado endurecido de acuerdo a las demandas de la edificación o infraestructura. De igual modo, en el caso de los materiales de construcción inteligentes, por ejemplo se evalúan las propiedades autonómicas como auto-limpieza y purificación del aire (Figura 4).

Figura 4. Evaluación técnica para el desarrollo de productos en el Parque Ambiental y Tecnológico de Santiago de Cali



Aunque los métodos de diseño de mezclas sirven de guía para un adecuado proporcionamiento de los componentes, el proceso de diseño con agregados reciclados, otros residuos y nanomateriales, demanda un recurrente ajuste en función de las características en estado fresco y propiedades en estado endurecido hasta la obtención del diseño de mezclas y proceso de fabricación definitivos. La confiabilidad de los resultados está basada en el diseño experimental que utiliza la comparación con mezclas de concreto y mortero, que utilizando agregados naturales y cemento convencional, cumplan con los mismos requerimientos mecánicos y durabilidad. Asimismo,

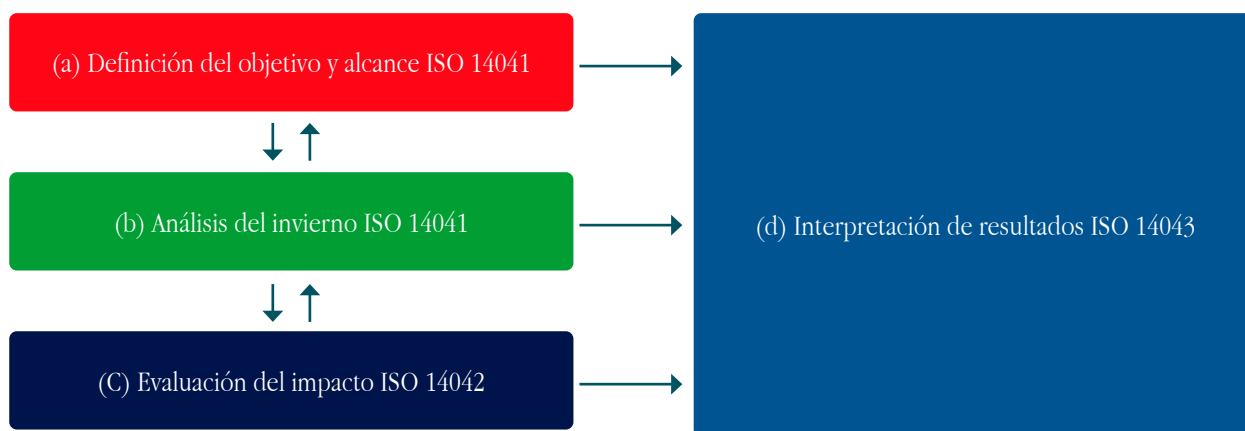
la utilización de ensayos y pruebas estandarizadas por entidades de amplio reconocimiento mundial y local, tales como son: el *American Concrete Institute (ACI)*, la *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)*, la Norma Técnica Colombiana (NTC) y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Además de la evaluación técnica, con el ánimo de garantizar la sostenibilidad de los productos, se desarrollará su respectivo análisis del ciclo de vida (ACV), herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos

ambientales y sociales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin del ciclo de vida. El ACV es por tanto una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción, con el fin de evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del

uso de recursos (energía, agua y materiales) y emisiones ambientales al aire, agua y suelo asociados con el sistema que se está evaluando. De acuerdo con las normas ISO 14040–14043, el ACV consta de cuatro etapas: (a) definición del objetivo y alcance, (b) creación del inventario, (c) evaluación del impacto y (d) interpretación de los resultados (Figura 5).

Figura 5. Etapas y normas para el desarrollo del análisis del ciclo de vida del portafolio de materiales de construcción (Pacheco Torgal F. et al, 2013).



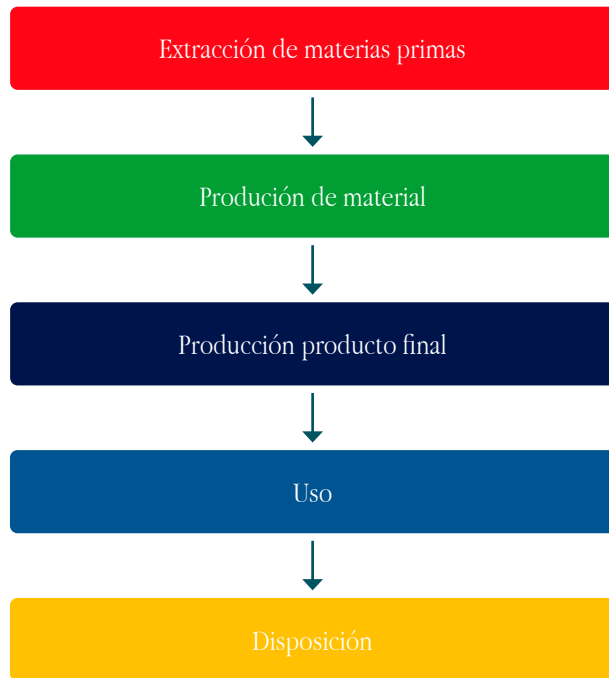
La primera etapa de un ACV es la definición del objetivo y el alcance. El objetivo de un estudio de ACV debe estar claramente definido, incluida la aplicación y el uso previsto de los resultados y usuarios (público objetivo). Los objetivos de un estudio de ACV son, por ejemplo, comparar dos o más productos que cumplen la misma función (e.g. concreto con agregados naturales y concreto con agregados reciclados), para identificar posibilidades de mejora de productos existentes o incluso innovación y diseño de nuevos productos. Por su parte, la determinación del alcance de un estudio de ACV establece los límites de la evaluación. Por ejemplo, incluye el sistema modelado y los métodos de evaluación. Los siguientes elementos deben describirse claramente en la definición del alcance: el sistema a estudiar y su función, la unidad funcional, las fronteras del sistema, los tipos de impacto y la metodología de evaluación de impacto, requisitos de calidad de los datos, supuestos y limitaciones (Pacheco Torgal F. et al, 2013).

El análisis del inventario es la segunda etapa en un ACV. Esta implica procedimientos de recopilación y cálculo de

datos para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de un producto. Estas entradas y salidas incluyen el uso de recursos, emisiones al aire, agua y suelo, y generación de residuos asociados al sistema. El análisis del inventario debe estar soportado en un árbol de procesos (diagrama de procesos, árbol de flujos) que define las fases en el ciclo de vida de un producto (Figura 6). Cada una de las diferentes fases puede estar compuesta de los diferentes procesos unitarios, por ejemplo, producción con diferentes tipos de materias primas para combinar en la fase de producción del material. Las diferentes fases a menudo están conectadas por procesos de transporte. Los datos sobre consumo de materiales, agua y energía, residuos y emisiones deben recopilarse para todas las unidades de proceso del ciclo de vida de un producto. Los datos pueden ser específicos del lugar (de empresas específicas, áreas específicas o países específicos) o más generales, como organizaciones comerciales o encuestas públicas. Para estudios de ACV detallados, se deben utilizar datos específicos del lugar. Los datos promedio (de organizaciones comerciales, de investigaciones previas del mismo producto o similar) se pueden utilizar

para ACV conceptuales o simplificados. Sin embargo, esta etapa suele ser la que más trabajo requiere, especialmente si los datos específicos del lugar son necesarios para todas las unidades de procesos del ciclo de vida del producto (Pacheco Torgal F. et al, 2013).

Figura 6. Ejemplo de un diagrama de flujo usado como soporte en el análisis del inventario (Pacheco Torgal F. et al, 2013).



La evaluación de impacto es la tercera etapa de un ACV. En esta etapa se evalúan los potenciales impactos ambientales del sistema modelado. Esta etapa consta de tres elementos obligatorios: (i) selección de las categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de caracterización, (ii) clasificación y (iii) caracterización. Las categorías de impacto se seleccionan para describir los impactos causados por el producto analizado o la familia de productos. Este es un seguimiento de las decisiones tomadas en la fase de determinación del objetivo y el alcance. Algunas de las categorías de impacto que se suelen considerar se encuentran son: consumo de fuentes no renovables, consumo de agua, potencial de calentamiento global, potencial de reducción de la capa de ozono, potencial de eutrofización, potencial de acidificación, potencial de formación de smog, toxicidad humana (cancerígena y no-cancerígena), toxicidad ecológica, generación de residuos, uso del suelo, contaminación del aire, alteración de hábitats.

Aunque hasta la fecha no hay consenso para una sola lista predeterminada de categorías de impacto o para un solo modelo de caracterización, lo cual puede ser congruente con las necesidades de los ecosistemas locales, la *Environmental Protection Agency* (EPA) y el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) de los Estados Unidos proponen para el análisis del ciclo de vida de los materiales de construcción las siguientes categorías de impacto y su peso relativo (Tabla 2).

Tabla 2. Categorías de impacto ambiental y su peso relativo para el análisis del ciclo de vida de los materiales de construcción (EPA & NIST, 2010).

Categoría de impacto ambiental	NIST	EPA
Calentamiento global	29	16
Acidificación	3	5
Eutrofización	6	5
Consumo de combustibles fósiles	10	5
Calidad del aire en interiores	3	11
Alteración de hábitats	6	16
Consumo de agua	8	3
Contaminación del aire	9	6
Formación de Smog	4	6
Eco-toxicidad	7	11
Destrucción de capa de ozono	2	5
Salud Humana	13	11
Sumatoria	100	100

Además de los elementos presentados en esta etapa, es posible incluir algunos elementos adicionales como: normalización, agrupación y análisis de la calidad de los datos. Es una clasificación cualitativa o cuantitativa, caracterización y evaluación de impactos a ecosistemas, salud humana y recursos naturales basados en los resultados del análisis de inventarios.

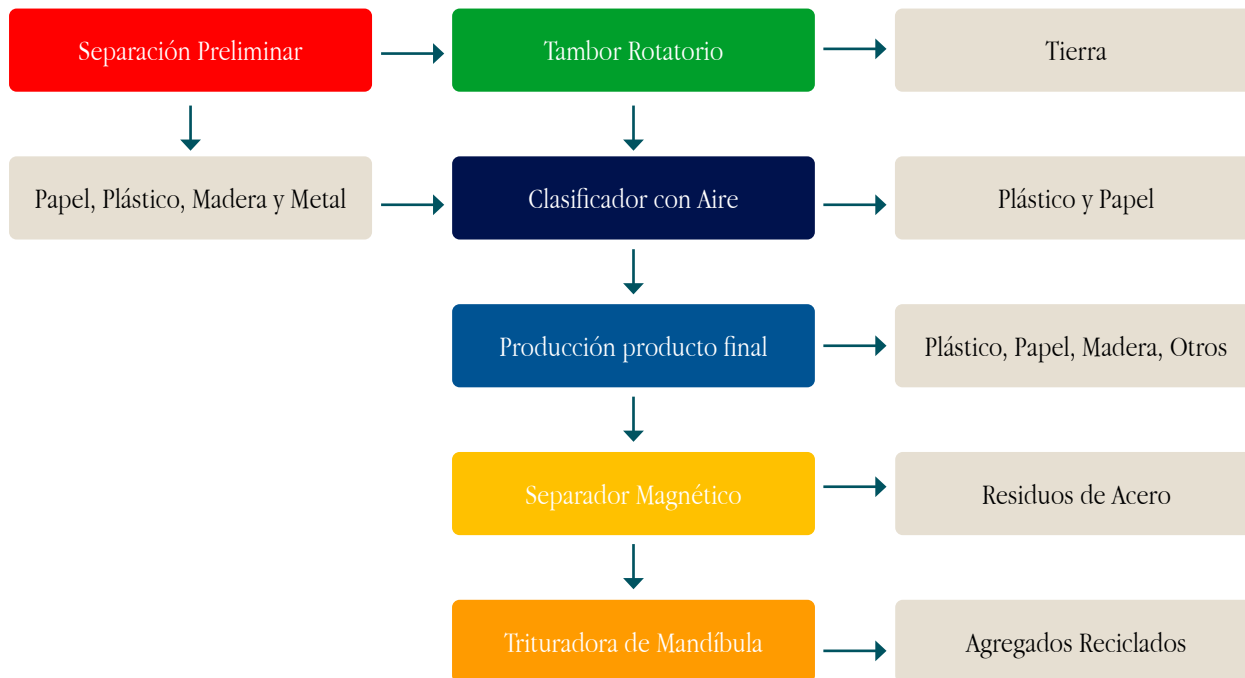
Finalmente, la interpretación es la cuarta fase de la LCA que contiene los siguientes aspectos principales: identificación de problemas ambientales significativos, evaluación de resultados con el objetivo de establecer su confiabilidad (integridad, sensibilidad y coherencia), conclusiones y recomendaciones.

Gestión y aprovechamiento de los RCD

Como el Parque Ambiental y Tecnológico de Santiago de Cali es el eje central del aprovecha-

miento de RCD, el proceso que busca la separación de materiales debe seguir como mínimo las etapas presentadas en la siguiente figura para la producción de agregados reciclados.

Figura 7. Proceso de separación para la producción de agregados reciclados a partir de RCD (Pacheco Torgal F. & Jalali S., 2011).

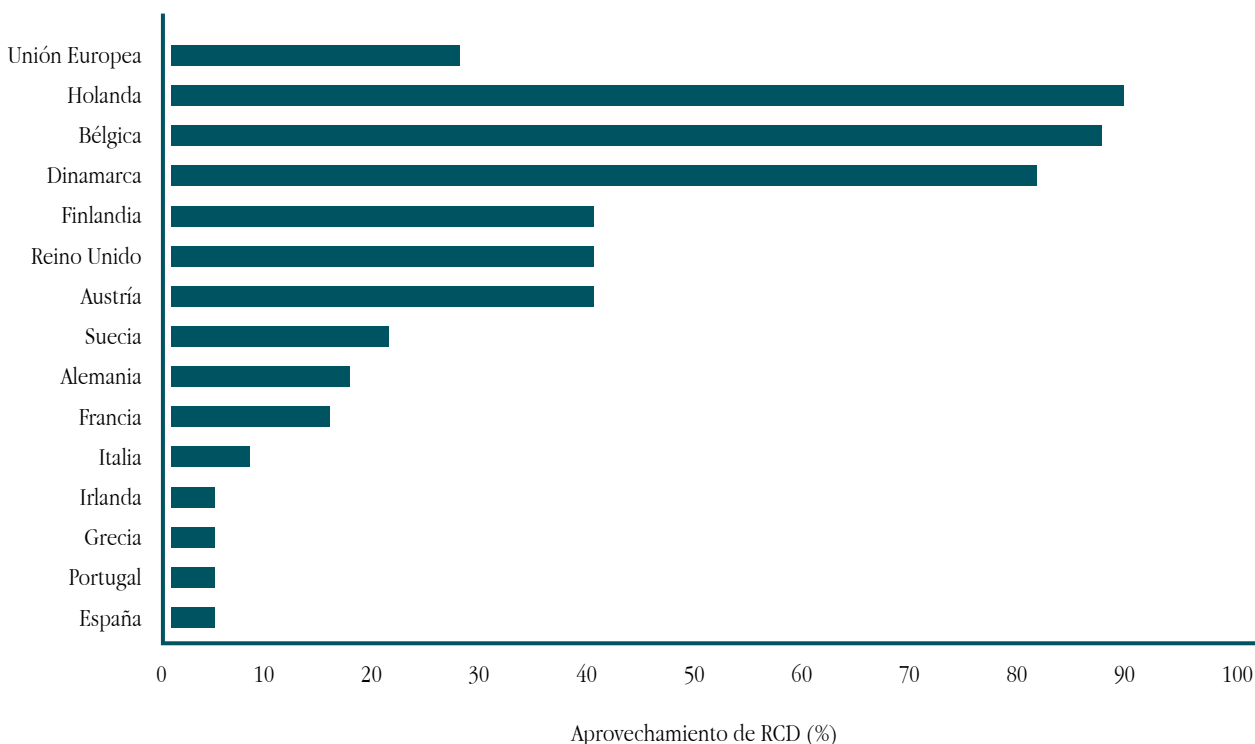


Vale destacar que el reciclaje de residuos de construcción y demolición no es una técnica sustancialmente nueva en el sector de la construcción, los primeros reportes científicos modernos datan de la década de los 40's en Europa central, con un incremento sustancial en la década de los 70's por las investigaciones desarrolladas por la Sociedad de Contratistas de la Construcción y el Ministerio de Obras del Japón debido a la crisis del petróleo. Hoy en día este país asiático cuenta con sistema de aprovechamiento completo de RCD, principalmente para pavimentos flexibles en subbases. Por su parte, en Taipei está creciendo el interés por el aprovechamiento de residuos del concreto, estimándose que cerca del 90% se recuperan, con un aprovechamiento del 95% para el concreto viejo. En Holanda y Finlandia se ha creado una legislación robusta que permite que casi todos los

RCD sean aprovechados, con algunas excepciones en la fase de producción. Más recientemente, 38 estados de Estados Unidos han aprobado el uso de agregados reciclados en subbases viales y 11 estados lo permiten en concreto nuevo. Por su parte, Brasil ya cuenta con plantas para el reciclaje de RCD, particularmente en Belo Horizonte y Sao Paulo.

Aunque existen grandes diferencias entre los índices de aprovechamiento de RCD en el norte, centro y sur de Europa (Figura 8), por su avance legislativo y tecnológico en el aprovechamiento (reutilización y reciclaje) de los RCD, esta región resulta de gran interés para el mundo. Precisamente la comunidad europea que contaba con un aprovechamiento del 28%, pretendía llegar en el año 2020 a un aprovechamiento promedio del 70% para los 15 estados miembros (Knauf GmbH España, 2013).

Figura 8. Aprovechamiento de residuos de la construcción en la Unión Europea (Knauf GmbH España, 2013).



Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que en Colombia se espera alcanzar como mínimo en el 2032 el uso de un 30% de RCD aprovechables en el peso total de los materiales usados en la obra (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), para el Parque Ambiental y Tecnológico se propone la norma europea EN 12620 (2002) para la clasificación de residuos de construcción y demolición en el Parque Ambiental y

Tecnológico. Esta norma de mayor nivel de detalle que la planteada en la Resolución 472 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017), permite un mejor aprovechamiento de los RCD. Esta norma está basada en 8 grupos de residuos principales y 7 categorías que indican la composición del grupo principal. Más detalles sobre la clasificación EN 12620 se encuentran en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Clasificación de RCD de acuerdo a la norma europea EN 12620.

Grupo	Descripción
Rc	Concreto, Productos de Concreto, Mortero, Bloques de Concreto
Ru	Agregado Natural, Agregado Reciclado limpio (sin mortero)
Rb	Ladrillos, Baldosas, Unidades de Mampostería, Concreto celular No Flotante
Ra	Material Bituminoso
Rg	Vidrio
FL ₅	Material Rocoso Flotante (<1mg/m ³)
FL _{n5}	Material No Rocoso Flotante (<1mg/m ³)
X	Otros: Material Cohesivo (suelos y arcillas), Metales, Plástico, Caucho, Madera No Flotante

Tabla 4. Composición detallada de los grupos de RCD de la norma europea EN 12620.

Componente	Contenido (% en peso)	Categoría
R_c	≥ 90	$R_c 90$
	≥ 70	$R_c 70$
	< 70	$R_c D$
	Sin requisito	$R_c SR$
$R_c + R_u$	≥ 90	$R_{cu} 90$
	≥ 70	$R_{cu} 70$
	≥ 50	$R_{cu} 50$
	< 50	$R_{cu} D$
	Sin requisito	$R_{cu} SR$
R_b	< 1	$R_b 10$
	< 5	$R_b 30$
	< 10	$R_b 50$
	> 50	$R_b D$
	Sin requisito	$R_b SR$
R_a	< 1	$R_a 1-$
	< 5	$R_a 5-$
	< 10	$R_a 10-$
$FL_s + FL_{ns}$	< 1	$FL_{total} 1$
	< 3	$FL_{total} 3$
FL_{ns}	$< 0,01$	$FL_{ns} 0,01$
	$< 0,05$	$FL_{ns} 0,05$
	$< 0,1$	$FL_{ns} 0,1$
$X + R_g$	$< 0,2$	$XR_g 0,2$
	$< 0,5$	$XR_g 0,5$
	$< 1,0$	$XR_g 1$

Estudio de casos

La familia de productos y metodología propuestos en el Modelo de Economía Circular para la Construcción están soportadas principalmente en investigaciones previas

desarrolladas en la Maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. A continuación se presentan algunos casos de estudio que resultan de gran valor para el Modelo de Economía Circular planteado (Figura 9).

Figura 9. Familia de eco-productos del Parque Ambiental y Tecnológico de Santiago de Cali.



- a.** Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto fabricado con agregados reciclados provenientes de adoquines.

En este trabajo de grado se evaluó la resistencia a la flexión y compresión de nueve mezclas de concreto (denominadas M1 hasta M9) con reemplazos parciales y totales del agregado natural fino y grueso por agregado reciclado proveniente de la trituración de adoquines de concreto provenientes de la Plaza del Municipio de Almaguer (Cauca). La metodología seguida incluyó cinco fases, desde el muestreo de los agregados hasta la selección de las mezclas de concreto con mejor desempeño mecánico para su utilización en nuevos adoquines. Los resultados muestran que las mezclas de concreto con reemplazo de un 50% en peso de la fracción fina natural (denominada M2) y 50% en peso de la fracción gruesa natural (denominada M4) cumplen con la resistencia requerida por la NTC-2017 para la fabricación de nuevos adoquines. Aunque se deben investigar técnicas para mejorar la resistencia al desgaste de las mezclas de concreto cuando se usan como adoquines, los porcentajes de uso de agregados reciclados presentados en este proyecto en relación a los reportados en la literatura son muy superiores. Por lo anterior, la solución planteada en este proyecto no solo tiene el potencial de

reducir significativamente el impacto ambiental negativo causado por la disposición inadecuada de residuos de construcción y extracción de recursos no renovables, sino que también tiene el potencial de reducir los costos de proyectos de construcción (Bravo German A.M. & Bravo Gómez I.D., 2018).

- a.** (b) Análisis experimental de las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia fabricado con agregados reciclados de concreto.

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del reemplazo parcial del agregado grueso natural por Agregado Reciclado de Concreto (ARC), en las propiedades mecánicas del Concreto de Alta Resistencia (CAR). Para alcanzar los objetivos planeados, se desarrolló una metodología experimental compuesta por cinco etapas, que incluye: la selección de los Residuos de Concreto (RC) y posterior producción del ARC, la caracterización de los materiales utilizados, la fabricación de los concretos con diferentes contenidos de ARC (0, 10, 20 y 40%), la determinación de las propiedades en estado fresco y endurecido de dichos concretos y, finalmente, el análisis de los resultados. Se concluyó que los ARC cumplen con las especificaciones de la normativa colombiana para agregados y que es posible la fabricación de concretos de alta resistencia. Además, la incorporación

del agregado reciclado tuvo un efecto positivo en las propiedades mecánicas y las relacionadas a durabilidad de los concretos, siendo que el remplazo parcial del 40% de ARC en relación al peso del agregado grueso, presentó el mejor desempeño. De esta manera, se viabiliza el uso de este residuo como material de construcción, lo que impacta positivamente al medio ambiente, al disminuir la explotación de los recursos naturales no renovables (Diosa Arenas J.S., 2020).

- b.** Comportamiento mecánico de elementos prefabricados de concreto con agregados reciclados dentro de la fuente que los genera.

Este proyecto desarrolló el diagnóstico de los residuos de construcción generados en obras civiles del área urbana del municipio de Pereira, de tal forma que una vez clasificados en obra, puedan ser incorporados en elementos prefabricados de concreto en la misma fuente donde se generan, brindando de esta manera un aporte a la reducción en la explotación del recurso natural, a la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y a menores requerimientos en áreas de terrenos para la disposición de residuos no aprovechados. En el desarrollo del proyecto, se clasificaron y cuantificaron los residuos de construcción de tres obras piloto en la ciudad de Pereira. A partir de esto, se reciclaron componentes provenientes de concretos y de agregado natural, a los cuales se les determinaron las propiedades más relevantes de carácter físico y mecánico, mediante ensayos de laboratorio. Se realizaron con estos agregados reciclados, nuevas mezclas de concreto, cuyo comportamiento mecánico se estableció mediante ensayos de resistencia a compresión y a flexión. Los costos de producción del agregado reciclado obtenido dentro de la fuente donde se generaron, fueron revisados y comparados con los precios del mercado, involucrando las actividades desde la fase inicial del proceso de clasificación. Con varias muestras de estas mezclas se elaboraron algunos elementos prefabricados y se analizó su comportamiento mecánico. Se estableció finalmente el grado de viabilidad técnica y económica para el uso de estos agregados reciclados dentro de las mismas obras de construcción de donde se obtuvieron, y circunscritas a las condiciones locales de la región aferente al Municipio de Pereira (Londoño Alarcón J.A., 2016).

- c.** Evaluación del efecto del remplazo parcial de cemento portland por ceniza de la industria del papel en morteros y muretes.

Las cenizas volantes provenientes de la combustión del carbón en el proceso de fabricación de la empresa Propal Carvajal fueron utilizados para esta investigación por poseer propiedades físicas y químicas que las hace adecuadas para su reutilización como sustitutos de las materias primas para morteros modificados, probándose el caso de la sustitución del cemento portland, evaluando el efecto que este remplazo tiene sobre las propiedades físicas y mecánicas del mortero. La investigación abordó desde la caracterización de las materias primas que constituyen el mortero, determinación de las propiedades mecánicas del mortero como la resistencia a la compresión hasta llegar a la evaluación del mortero modificado como material de unión para los muretes. Este estudio demostró que al reemplazar el cemento en porcentajes mayores al 10% de cenizas volantes se obtiene una mezcla con mayor trabajabilidad pero menor resistencia en relación al mortero tradicional. Se concluye que es mecánicamente viable el uso de ceniza proveniente de la industria del papel para la preparación de morteros, toda vez que este material se emplee en mampostería de bloques convencionales (Hurtado Portocarrero I.A., 2019).

- d.** Evaluación de cubiertas verdes semi-intensivas con capas de drenaje elaboradas con materiales reciclados y reutilizados.

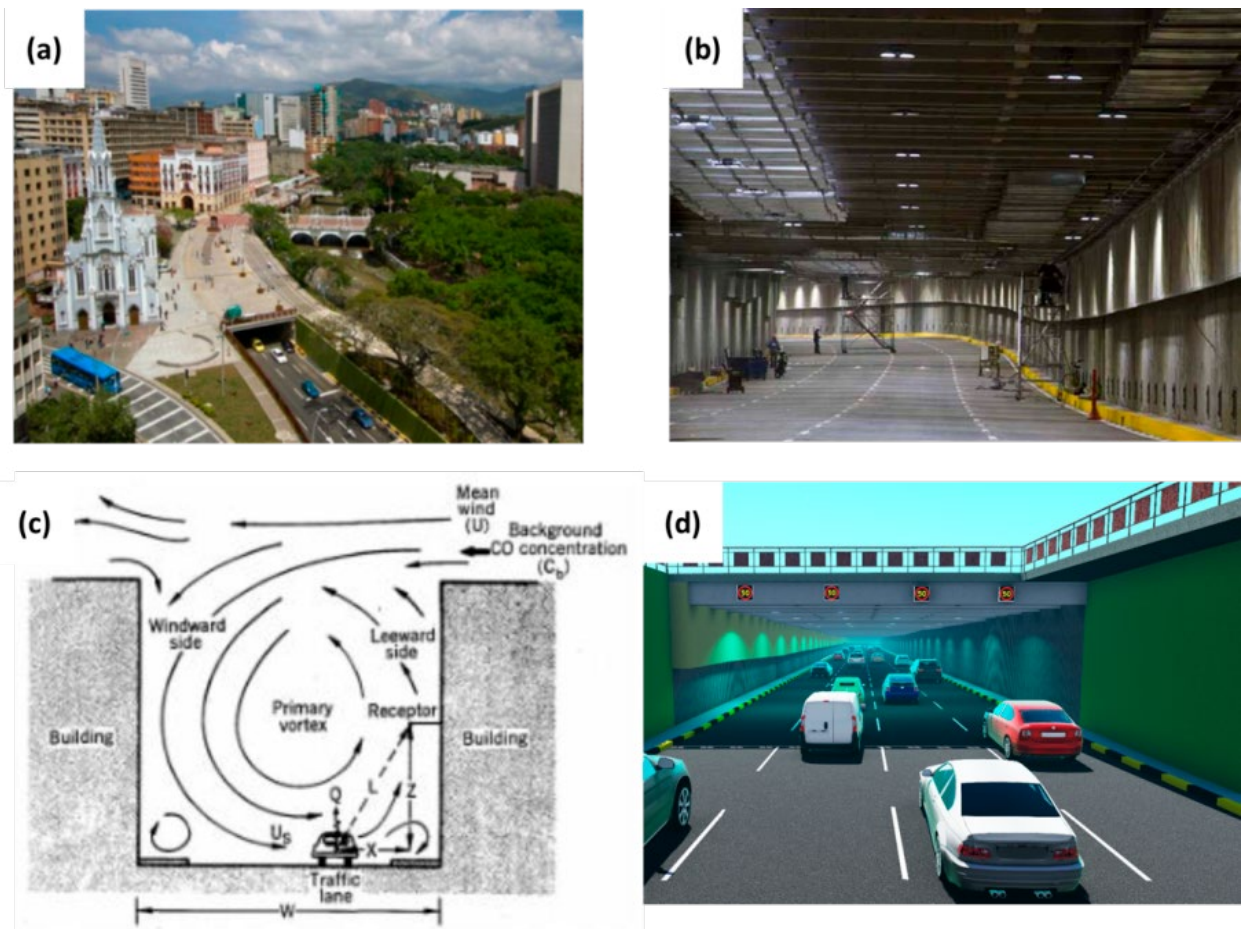
En esta investigación se evaluó mediante prototipos a escala, el desempeño hidráulico, térmico, mecánico, impacto en cargas muertas y costos asociados a cuatro sistemas de cubiertas verdes semi-intensivas en los que se utilizaron materiales reciclados (caucho y bandeja PEAD) y reutilizados (botellas PET) para el sistema de drenaje, y se compararon con el sistema de drenaje convencional que utiliza agregado de origen natural (grava basalto). Para las condiciones evaluadas, los resultados muestran que algunos sistemas pueden ser más útiles cuando la aplicación tenga la intención de reducir la temperatura, y otros cuando sea la retención de agua. Además, ponen en manifiesto el potencial de reducir las cargas muertas y costos de las cubiertas verdes tradicionales cuando se utilizan materiales reciclados y reutilizados (Naranjo Mejía A., 2017).

- e. Diseño de un sistema para generar purificación del aire y auto-limpieza en las superficies del túnel de la Avenida Colombia (Cali).

La contaminación atmosférica tiene un efecto negativo directo sobre la calidad de vida de las personas y los ecosistemas (incluyendo la infraestructura). Dado que a nivel urbano una de las principales fuentes de generación de contaminantes son los vehículos, diferentes estrategias para desestimular el uso de vehículos se vienen implementando sin mucho éxito en Colombia. Por tal motivo, en este proyecto se diseñó un sistema para generar purificación del aire y auto-limpieza en el Túnel de la Avenida Colombia de Santiago de Cali (Figura 10). Para lograr el anterior objetivo, se evaluaron, técnica y financieramente, un mortero y un recubrimiento fotocatalítico utilizando

TiO₂ y luz artificial con rayos UV-A. En este caso, para el seguimiento a la fotoactividad se utilizaron dos colorantes artificiales (azul de metileno y rodamina b) aplicados en la superficie de los materiales fotocatalíticos, los cuales fueron expuestos de manera controlada a rayos UV-A utilizando un fotoreactor. La remoción de dichos colorantes fue seguida mediante análisis digital de imágenes con el software ImageJ. Las eficiencias obtenidas en la remoción de estos colorantes, los cuales son indicadores de la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, fueron simulados en el modelo Street Canyon (desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación Ambiental de Dinamarca), encontrándose resultados prometedores para la remoción de óxidos nitrosos, dióxido de azufre, monóxido de carbono e hidrocarburos totales (Medina Medina A.F. et al., 2016).

Figura 10. Diseño de un sistema de purificación del aire y auto-limpieza en el Túnel de la Avenida Colombia en Santiago de Cali. (a) Localización del túnel, (b) características geométricas del túnel, (c) modelo de la calidad del aire utilizado, (d) modelo del sistema de iluminación y recubrimiento fotocatalítico en operación (Medina Medina A.F. et al., 2016)



Conclusiones

Considerando que la construcción es un sector productivo tan antiguo y tradicional en Colombia y el mundo, el modelo de economía circular propuesto demanda un alto grado de innovación para la correcta formulación e implementación de conceptos y tecnologías como la valoración de extracción de activos ambientales, producción limpia, *Building Information Modeling* (BIM), robotización, impresión 3D, consumo responsable, flexibilidad arquitectónica, arquitectura transformable, deconstrucción, reciclaje y simbiosis industrial. Por lo anterior, se propone el trabajo articulado y continuo entre la sociedad civil, el gobierno, el sector empresarial y la academia que garantice el verdadero desarrollo de un ecosistema de investigación, creación, desarrollo, innovación y emprendimiento.

La economía circular, nuevo paradigma de desarrollo económico especialmente importante para la pospandemia, genera grandes oportunidades para la articulación del sector construcción con las comunidades vulnerables y el medio ambiente. En este sentido, el modelo propuesto debe considerar, en etapas de desarrollo e implementación posteriores, el análisis de flujos de energía y agua, así como las emisiones gaseosas y material particulado. Igualmente, mediante herramientas como el *Social Life Cycle Assessment* (S-LCA), se recomienda la valoración de los aspectos sociales y sociológicos desde la producción de materiales de construcción, procesos constructivos, uso y operación, y terminación del ciclo de vida de edificaciones e infraestructura.

Finalmente, en relación al flujo de materiales, el modelo de economía circular propuesto para el sector construcción de Santiago de Cali debe, en etapas posteriores, fortalecer la simbiosis industrial mediante la valoración de residuos de otra naturaleza diferente a los cerámicos. Por ejemplo, resulta estratégico el aprovechamiento de residuos poliméricos y metálicos para la reducción del impacto ambiental de las familias de productos que constituyen el portafolio del Parque Ambiental y Tecnológico. Sin embargo, en esta primera etapa los residuos cerámicos aprovechables y demandados permiten potencialmente garantizar el éxito del modelo con las familias de productos planteadas.

Referencias

- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - ACODAL Seccional Occidente. (2017, diciembre). Caracterización exhaustiva de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) que ingresan a la Estación de Transferencia de la carrera 50 de la ciudad de Cali e identificación de su potencial de transformación en eco productos para la construcción. ACODAL.
- [7] Bravo Germán, A. M., & Bravo Gómez, I. D. (2018, noviembre). Evaluación de las Propiedades Mecánicas de Concreto Fabricado con Agregados Reciclados Provenientes de Adoquines. Pontificia Universidad Javeriana Cali. <http://vitela.javerianacali.edu.co/>
- [8] Bravo German, A. M., Bravo Gómez, I. D., Mesa, J. A., & Maury Ramírez, A. (En Edición). Mechanical properties of concrete using recycled aggregates obtained from old paving stones. Sustainability.
- [9] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020, agosto). Primer Reporte de Economía Circular. DANE. <https://doi.org/10.3390/coatings10080728>
- [10] Diosa Arenas, J. S. (2020, marzo). Análisis Experimental de las Propiedades Mecánicas del Concreto de Alta Resistencia Fabricado con Agregados Reciclados de Concreto. Pontificia Universidad Javeriana Cali. <http://vitela.javerianacali.edu.co/>
- [11] Environmental Protection Agency - EPA & National Institute of Standards and Technology - NIST. (2010). Building for Environmental and Economic Sustainability (Versión 1). [https://ws680.nist.gov/BEES/\(A\(GuCvkIQj1wEkAAAAN2MyYTg0YmUtNTEyYi00MzVh1WJkNjgtYzgwOThmODM2ZmU32nS8eQ9qI8EbZ-p8iHa-LXWwInE1\)\)/Default.aspx](https://ws680.nist.gov/BEES/(A(GuCvkIQj1wEkAAAAN2MyYTg0YmUtNTEyYi00MzVh1WJkNjgtYzgwOThmODM2ZmU32nS8eQ9qI8EbZ-p8iHa-LXWwInE1))/Default.aspx)
- [12] European Committee For Standardization - CEN. (2002, 17 septiembre). EN 12620:2002 Aggregates for Concrete. iTeh Standards Store. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1069cdce-28c1-437f-9528-89f79e684dfc/en-12620-2002>

- [13] Hurtado Portocarrero, I. A. (2019, septiembre). Evaluación del Efecto del Reemplazo Parcial del Cemento Portland por Ceniza de la Industria del Papel en Morteros y Muretes. Pontificia Universidad Javeriana Cali. <http://vitela.javerianacali.edu.co/>
- [14] Knauf GmbH España. (2013, 1 junio). Reciclaje y cierre del ciclo de vida de las placas de yeso laminado. Anales Sectoriales - Reciclaje y Gestión de Residuos. <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/109556-Reciclaje-y-cierre-del-ciclo-de-vida-de-las-placas-de-yeso-laminado.html>
- [15] Londoño Alarcón, J. A. (2016, julio). Comportamiento Mecánico de Elementos Prefabricados de Concreto con Agregados Reciclados Dentro de la Fuente que los Genera. Pontificia Universidad Javeriana Cali. <http://vitela.javerianacali.edu.co/>
- [16] Medina Medina, A. F., Torres Rojas, D. F., Meza Girón, G., & Villota Grisales, R. A. (2016, mayo). Diseño de un Sistema para Generar Purificación del Aire y Auto-limpieza en las Superficies del Túnel de la Avenida Colombia (Cali). Pontificia Universidad Javeriana Cali. <http://vitela.javerianacali.edu.co/>
- [17] Maury Ramírez A. (2011). Cementitious Materials with Air-Purifying and Self-Cleaning Properties Using Titanium Dioxide Photocatalysis. Ghent University (Bélgica). <https://biblio.ugent.be/publication/2020062>
- [18] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017, 28 febrero). Resolución 0472 del 28 de Febrero de 2017. Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>
- [19] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Comercio Industria y Turismo, & Presidencia de la República. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular: Cierre de Ciclos de Materiales, Innovación Tecnológica, Colaboración y Nuevos Modelos de Negocio (1.a ed., Vol. 1) [Libro electrónico]. MinAmbiente. https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documentos/Comite%20Sostenibilidad/Presentaciones/Sesi%C3%B3n%202/1_Metas_Estrategia_Nacional_Economia_circular.pdf
- [20] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015, 10 julio). Resolución 0549 del 10 de Julio de 2015. Ingeniería Sostenible. <http://ismd.com.co/wp-content/uploads/2017/03/Resoluci%C3%B3n-549-de-2015.pdf>
- [21] Muñoz Muñoz, H. A. (2015). Construcción, Interventoría y Supervisión Técnica de las Edificaciones de Concreto Estructural según el Reglamento Colombiano NSR-10 (1.a ed., Vol. 1). Asociación Colombiana de Productores de Concreto - ASOCRETO. <http://www.asocretovirtual.com/tienda-virtual/index.php?route=product/category&path=61&limit=100>
- [22] Naranjo Mejía, A. (2017, febrero). Evaluación de cubiertas verdes semi-intensivas con capas de drenaje elaboradas con materiales reciclados y reutilizados. Pontificia Universidad Javeriana Cali. <http://vitela.javerianacali.edu.co/>
- [23] Pachecho Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Eco-efficient Construction and Building Materials (1a Edición). Springer-Verlag London.
- [24] Pacheco Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J., & John, V. M. (2013). Eco-efficient Concrete (1a Edición). Woodhead Publishing.
- [25] Pinto Campos, B. C. (2019, febrero). Arquitectura y Diseño Flexible: una revisión para una construcción más sostenible. Universidad Politécnica de Cataluña - UPC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/176433>
- [26] Portland Cement Association (PCA). Concrete Sustainability Hub. Recuperado 17 de enero de 2020, de <https://www.cement.org/learn/mit>
- [27] Sánchez De Guzmán, D. (2011). Colección del Concreto - Durabilidad y Patología de Concreto (2a Edición). ASOCRETO.

Los Autores



Anibal Maury Ramírez

Dr. Ing. Anibal Maury Ramírez, Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad El Bosque, Miembro del Grupo de Investigación en Producción Limpia Choc Izone. Ingeniero Civil egresado de la Universidad del Norte. Gracias a su desempeño académico, fue merecedor de la Beca de la Unión Europea, “ALFA Program on Materials Science”, donde trabajó “TiO₂ impregnation of concrete and plaster surfaces” en Tampere University (Finlandia). Cuenta con formación doctoral en Ingeniería Civil de Ghent University (Bélgica) con el trabajo en “Cementitious materials with air-purifying and self-cleaning properties using titanium dioxide photocatalysis”. Adelantó un posdoctorado en The Hong Kong Polytechnic University (Hong Kong, China) en el desarrollo de materiales de construcción sostenibles. Ha estado vinculado al diseño de edificaciones (e.g. solar decathlon) y comunidades sostenibles (e.g. comunidad indígena nasa en Colombia). Fue Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle, Coordinador de Posgrados Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Profesor de la Universidad del Atlántico, entre otros.