

**PROPUESTA DE MEJORA A LINEAMIENTOS SOBRE LA GESTIÓN DE LOS  
RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN OBRAS DE  
INFRAESTRUCTURA VIAL: UNA CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD  
EN BOGOTÁ DISTRITO CAPITAL.**



**DIANA KATHERINE RIOS PARRA**

Trabajo de grado presentado como parte de los requisitos de grado en la Maestría  
en Gestión Ambiental

Directora

Vivian Andrea Ulloa Mayorga

Directora programa de Ingeniería Civil – Universidad Pontificia Javeriana

Codirectora

Gina Paola González Angarita

Directora programa Ingeniería Ambiental – Universidad Libre

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES  
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C. MARZO 2021

ARTÍCULO 23, RESOLUCIÓN #13 DE 1946.

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”

## **Dedicatoria**

A MI PADRE: Con todo mi amor y respeto le dedico este trabajo de grado a la persona que me enseñó que en la vida todo se logra a base de sacrificio y perseverancia.

## **Agradecimientos**

Mi más sincero agradecimiento a:

Dra. Vivian Andrea Ulloa Mayorga

Dra. Gina Paola González Angarita

Por todas esas horas de lucidez y dedicación en las que me guiaron durante la ejecución de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1 INTRODUCCIÓN .....	14
1.1 Problema.....	14
1.2 Justificación.....	18
1.3 Propósito del proyecto y pregunta de investigación.....	20
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 Objetivo general .....	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3 MARCO DE REFERENCIA .....	23
3.1 Marco Conceptual .....	23
3.1.1 Gestión de Residuos sólidos .....	23
3.1.2 Residuos de construcción y demolición - RCD .....	26
3.1.3 Sistemas de gestión integral de residuos sólidos (SGIRS) .....	26
3.1.4 Aprovechamiento de RCD.....	27
3.2 Marco Teórico .....	28
3.2.1 Desarrollo sostenible (DS).....	28
3.2.2 Desarrollo de la industria y Contaminación ambiental. ....	30
3.2.3 Gestión de RCD en la unión europea .....	31
3.2.4 Gestión de los RCD en Latinoamérica .....	32
3.2.5 Gestión de los RCD en Bogotá.....	32
3.2.6 Actores vinculados a la cadena de gestión de RCD. ....	39
3.2.7 La dinámica de sistemas como eje articulador en la sostenibilidad y el sector de la construcción.....	40

3.2.8	Gestión de RCD y su impacto en los Objetivos Desarrollo Sostenible (ODS)	42
3.2.9	Economía Circular y su impacto económico, social y ambiental .....	44
3.3	Marco Normativo .....	45
3.4	Antecedentes .....	49
4	ÁREA DE ESTUDIO.....	52
5	MATERIALES Y MÉTODOS .....	53
5.1	Diseño del estudio .....	54
5.2	Población y muestra .....	55
5.3	Métodos de Recolección y Análisis de Datos .....	55
5.3.1	Revisión Sistemática de Información.....	57
5.3.2	Modelo de Sostenibilidad.....	59
5.3.3	Validación del Modelo de Simulación y Lineamientos.....	62
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
6.1	Revisión Sistemática .....	62
6.2	Modelo de Simulación .....	70
6.2.1	Subsistema Económico.....	73
6.2.2	Subsistema Social.....	75
6.2.3	Subsistema Ambiental .....	77
6.2.4	Validación del Modelo de Simulación y Lineamientos.....	82
7	CONCLUSIONES .....	91
8	REFERENCIAS .....	95
9	ANEXOS.....	106
9.1	Anexo A. Base de datos Revisión Sistemática.....	106
9.2	Anexo B. Base de datos Modelo de Simulación Sostenible .....	106

9.3	Anexo C. Validación Grupo de Expertos.....	106
9.4	Anexo D. Consentimiento informado .....	106

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Porcentaje de reúso o reciclaje en la Unión Europea. ....	31
Tabla 2. Estrategias de reducción .....	33
Tabla 3. Estrategias de reúso .....	36
Tabla 4. Estrategias de reciclaje .....	37
Tabla 5. Estrategias de disposición final .....	37
Tabla 6. Marco legal aplicable al proyecto.....	46
Tabla 7. Formato base de datos. ....	58
Tabla 8. Variables de nivel del modelo de simulación.....	60
Tabla 9. Estrategias de gestión de RCD .....	64
Tabla 10. Contratos Modelo de Simulación Sostenible .....	71
Tabla 11. Lineamientos para la gestión de los RCD en Bogotá. ....	87

## LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos .....	27
Figura 2. Desarrollo sostenible (DS) .....	29
Figura 3. Principios rectores de la gestión de RCD (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016) .....	33
Figura 4. Clasificación de los Residuos de Construcción y Demolición.....	35
Figura 5. Pasos para elaborar y reportar el Plan de Gestión de RCD a la SDA. ....	38
Figura 6. Diagrama de flujo sencillo de la dinámica de sistemas.....	41
Figura 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	43
Figura 8. Enfoque de los Objetivos del Desarrollo Sostenible.....	44
Figura 9. Localización del área de estudio. ....	53
Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología a desarrollar en el trabajo de grado. ....	54
Figura 11. Modelo de simulación sobre la gestión integral de los RCD por parte de las áreas ejecutoras de contratos de obra del IDU.....	73
Figura 12. Simulación variable "Costos" 2030 – Contrato No. IDU 1385 del 2017.....	74
Figura 13. Simulación variable "Costos" 2025 – Contrato No. IDU 1385 del 2017.....	74
Figura 14. Simulación variable "Costos" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015. ....	75
Figura 15. Simulación variable "Empleos Verdes" 2025 – Contrato No. IDU 1385 del 2017. .....	76
Figura 16. Simulación variable "Empleos Verdes" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015. .....	77
Figura 17. Simulación variable "RCD Dispuesto" 2025 – Contrato No. IDU 1385 del 2017. .....	78
Figura 18. Simulación variable "RCD Dispuesto" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015. .....	78
Figura 19. Simulación variable "RCD Reutilizado" 2025 - Contrato No. IDU1385 del 2017. .....	79
Figura 20. Simulación variable "RCD Reutilizado" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015. .....	79
Figura 21. Simulación variable "Material Reciclado" 2025 - Contrato No. IDU1385 del 2017. ....	80
Figura 22. Simulación variable "Material Reciclado" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015. ....	80
Figura 23. Simulación variable "Material Recurso Natural" 2025 - Contrato No. IDU1385 del 2017. ....	81
Figura 24. Simulación variable "Material Recurso Natural" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015. ....	81
Figura 25. Validación del modelo de simulación sostenible.....	83



## **LISTADO DE GRAFICAS**

Grafica 1. Comportamiento de los RCD generados en Bogotá – junio de 2016 a junio de 2019 .....	16
--	----

## RESUMEN

El acelerado crecimiento urbano y las actividades de conservación de la infraestructura en Bogotá, ha develado una problemática ambiental que se intensifica progresivamente; de acuerdo con la Secretaría Distrital de Planeación (2017), la huella urbana de Bogotá región ha crecido de manera acelerada, pasando de 56.662 hectáreas a 63.451 hectáreas tan solo entre los años 2010 y 2016, y, a pesar de las condiciones atípicas generadas en el año 2020 (a causa de la pandemia por COVID-19), a cierre del año se generaron ejecuciones presupuestales por parte del IDU de alrededor de un billón de pesos en adjudicación de estudios y diseños, obras de construcción y mantenimiento de la malla vial, así como terminación de obras que venían de años anteriores (Ramírez, 2020); las obras de infraestructura asociadas a dichos procesos han venido causando un incremento significativo en la generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), los cuales no están siendo gestionados de manera adecuada. Para afrontar dicha situación, actores públicos y privados han implementado estrategias orientadas principalmente en la reducción, reutilización, reciclado, y disposición final adecuada de este tipo de residuos, a través de la inclusión al ciclo productivo de la construcción, sin embargo, los resultados obtenidos no han sido suficientes para alcanzar unos mayores volúmenes de aprovechamiento de este residuo, es por esto que se identifica la necesidad de proponer lineamientos para mejorar la gestión de estos residuos en la ciudad, promoviendo ajustes en la política pública y desarrollando diferentes tipos de mecanismos para promover la gestión adecuada de los RCD desde las fase misma de planeación, hasta la disposición final, y considerando dentro de dichos mecanismos de acción a los actores que forman parte inherente del proceso.

Es por ello que en esta investigación se adelantó la revisión sistemática de 200 documentos sobre la gestión integral de los RCD a nivel nacional e internacional, a través de los cuales se identificaron y analizaron los procedimientos y estrategias que se implementan actualmente para la gestión adecuada de los RCD, para, posteriormente, dar paso al desarrollo de un modelo de simulación que permitiese evaluar el efecto que se puede generar en las diferentes variables de sostenibilidad vinculadas a la gestión de RCD, a partir de escenarios

de simulación, en donde se buscó principalmente analizar la viabilidad de un aumento del porcentaje de aprovechamiento de los RCD de acuerdo con lo establecido en la resolución 01115 del 2012, emitida por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). Como resultado del análisis de la dinámica del sistema, se generaron una serie de lineamientos y recomendaciones orientados a mejorar la gestión de RCD en obras de infraestructura desarrolladas en Bogotá.

Por último, se lleva a cabo la validación de los mismos y del modelo de simulación, a través de un grupo de expertos que representan los principales actores en la cadena de valor de este tipo de material, tales como: la academia, la autoridad ambiental quien formula la política pública y ejerce el seguimiento y control que para el caso de Bogotá se encuentra en cabeza de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), representantes del sector productivo de materiales de tipo reciclado y representación de grandes generadores como es el caso del Instituto de Desarrollo Urbano IDU. Para finalmente proponer dieciocho lineamientos de mejora en la gestión de los RCD clasificados desde los aspectos cultural, económico, legal, tecnológico y ambiental como una contribución a la sostenibilidad en Bogotá Distrito Capital.

Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan a una mejor comprensión de las oportunidades de mejora sobre la gestión integral de los RCD, con la expectativa que puedan ser puestas en consideración por las autoridades competentes en la toma de decisiones a nivel local, regional y nacional en la gestión de los RCD y que además proporcione una referencia útil para el desarrollo de nuevas líneas de investigación.

## ABSTRACT

The effects of rapid urban growth and infrastructure conservation activities in Bogotá have revealed an environmental problem that is progressively increasing; According to Secretaría Distrital de Planeación (2017), the urban footprint of the Bogotá region has grown rapidly, going from 56.662 hectares to 63.451 hectares just between 2010 and 2016, and, despite the atypical conditions generated in 2020 (due to COVID-19 pandemic), at the end of the year, the Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) generated budget executions of around one billion Colombian pesos in the award of studies and designs, construction works and maintenance of the road network, as well as the completion of construction projects that came from previous years (Ramírez, 2020); The infrastructure works associated with these processes have been causing a significant increase in the generation of Construction and Demolition Waste (CDW), which are not being adequately managed. To face this situation, public and private actors have implemented strategies aimed mainly at the reduction, reuse, recycling, and adequate final disposal of this type of waste, through the inclusion in the production cycle of construction, however, the results obtained have not been enough to achieve higher volumes of use of this waste, which is why the need to propose guidelines to improve the management of CDW in the city is identified, promoting adjustments in public policy and developing different types of mechanisms to promote the adequate management of CDW from the planning phase itself, until the final disposal, and considering within these mechanisms of action the actors that are an inherent part of the process.

For this reason, this research carried out a systematic review of 200 documents on the comprehensive management of CDW at the national and international level, through which the procedures and strategies that are currently implemented for the proper CDW management were identified and analyzed to subsequently be able to develop a simulation model that would allow evaluating the effect that can be generated in the management of CDW through different sustainability variables, from simulation scenarios, where it was mainly analyzed the viability of a percentage increase in the use of CDW in accordance with the provisions of resolution 01115 of 2012, issued by Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). As a result of the analysis of system dynamics, a series of guidelines and recommendations

were generated aimed at improving CDW management in infrastructure projects developed in Bogotá.

Finally, the validation and the simulation model is carried out, through a group of experts who represent the main actors in the value chain of this type of material, such as: the academy, the environmental authority who formulates public policy and exercises the monitoring and control that in the case of Bogotá is headed by the SDA, representatives of the productive sector of recycled materials and representation of large generators such as IDU. To finally propose eighteen guidelines for improvement in the management of CDW classified from cultural, economic, legal, technological and environmental aspects as a contribution to sustainability in Bogotá Capital District.

It is expected that the results of this research will contribute to a better understanding of the opportunities for improvement on the integral management of CDW, with the expectation that they can be taken into consideration by the competent authorities in decision-making at local, regional and national levels in the management of CDW and that they also provide a useful reference for the development of new lines of research.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Problema

La gestión inadecuada de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) es considerada una problemática mundial, dados los impactos ambientales que se derivan (Ortega Acosta et al., 2016). En la Unión Europea para el año 2018 el 46% de los residuos totales producidos corresponden a 820 millones de toneladas de RCD y que por su volumen y peso, dificulta su manejo y demanda una alta ocupación de suelo (Gálvez-Martos et al., 2018). En Asia, el porcentaje de RCD generado por año, corresponde a 25% en Hong Kong y 48% en Corea del Sur, en consecuencia un aporte de 450 kg por año por habitante (Won & Cheng, 2017). Para el año 2017 en la ciudad de Shenzhen un derrumbe provocado por el colapso de un relleno de RCD, trajo como consecuencia la muerte de 73 personas y dañó 33 edificios, incluyendo fábricas, residencias de trabajadores y apartamentos (Yang et al., 2017). La disposición de dichos residuos en rellenos daría como resultado una pérdida de materias primas, emisiones contaminantes indeseables, pérdida de energía y uso del espacio (Hendriks & Janssen, 2001).

En Latinoamérica los RCD también ocasionan un impacto negativo en los ecosistemas, la sociedad y economía. Para el año 2009 en Chile, el sector de construcción generó 5.821 millones de toneladas de RCD, cifra que corresponde al 34,4% de los residuos urbanos totales del país, en consecuencia se aumentó el uso de terrenos para su disposición y los costos que implican su adecuado manejo (Bravo et al., 2019). En Brasil dichos residuos son dispuestos en sitios ilegales como lotes baldíos y áreas de preservación, generando contaminación visual, obstrucción de los sistemas de drenaje urbano, proliferación de vectores y enfermedades (Córdoba et al., 2019). Por otra parte, Costa Rica enfrenta problemáticas para el adecuado manejo de los RCD por falta de educación en construcción sostenible a nivel universitario, capacitación a los trabajadores de la construcción en temas de manejo de residuos y concientización ambiental (Abarca-Guerrero et al., 2017).

De acuerdo con información emitida por el Ministerio del Medio Ambiente en el año 2019, en Colombia los RCD equivalen en promedio a un 40% de los residuos sólidos totales generados, con una producción media de 22'270.338 toneladas (Marín, 2019). El RCD se ha convertido en un problema en Medellín y su área metropolitana por la disposición de hasta 4600 toneladas por día y en rellenos sanitarios legales 2400 toneladas por día, así mismo, se evidencia una disposición inadecuada de 3400 toneladas por día sobre el recurso hídrico y zonas que no están acondicionadas para tal fin (Mejía Restrepo et al., 2015). Para el año 2015 Santiago de Cali era considerada la segunda ciudad con mayor producción de RCD después de Bogotá, en donde se producen alrededor de 2480 metros cúbicos diarios, representando una gran dificultad pues no se cuenta con sitios suficientes de disposición final, siendo reemplazados por los parques, zonas verdes y vías, convirtiéndolos en focos de contaminación y un problema de salubridad alrededor de la ciudad que afecta directamente a la población en general (Robayo Salazar et al., 2015).

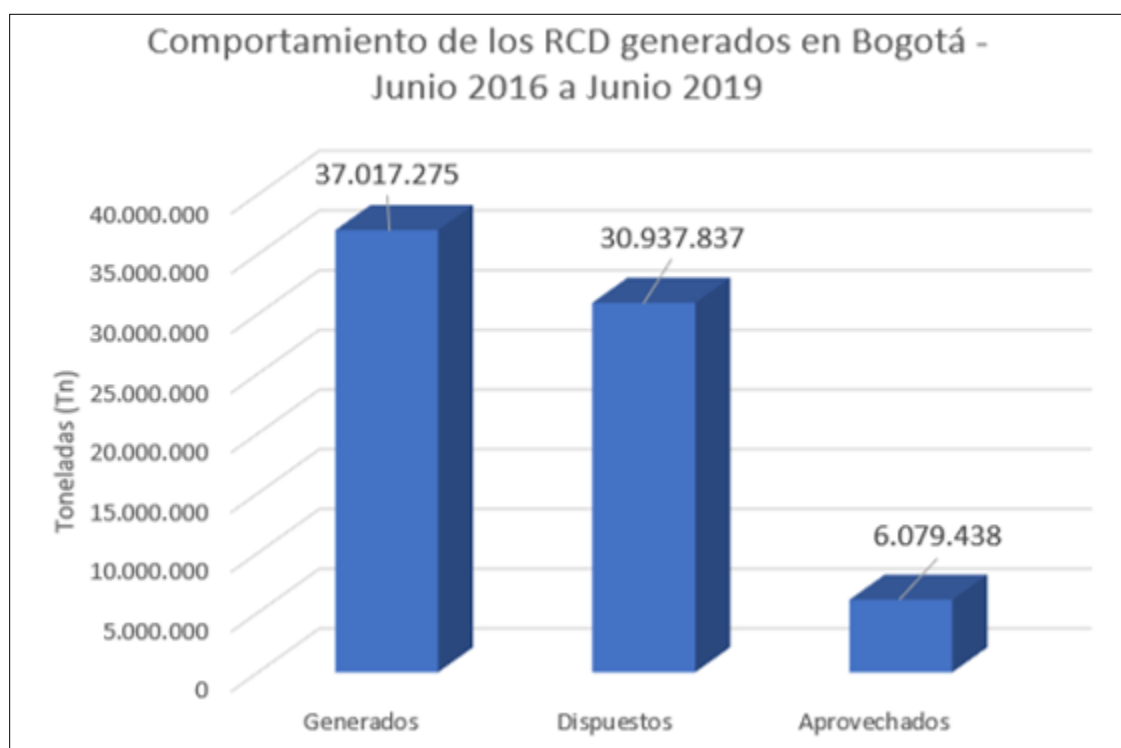
En el caso de la ciudad de Bogotá, el manejo de los RCD ha sido una problemática desde la década de los 90 por el acelerado crecimiento urbano, que constituye procesos de expansión y renovación los cuales incrementan la producción de residuos (Cerchiaro Daza, 2018). Por parte de las autoridades ambientales competentes (AAC), existe una dificultad en el seguimiento y control, en razón a que los niveles de responsabilidad institucional superan su capacidad de vigilancia. Sin embargo, de acuerdo con un informe emitido por el Departamento Nacional de Planeación DNP (2019), en Colombia, un total de 248.309 toneladas de residuos sólidos generados en el año 2018, fueron dispuestas por sitios no autorizados, esto corresponde a un 2,2% del total de residuos generados en dicho año).

Uno de los principales problemas que se genera en Bogotá a partir de la disposición ilegal de los RCD, es la afectación a los humedales, en especial a los suelos hidromórfos, ocasionando la pérdida de los espejos de agua, la Zona de Manejo y Preservación Ambiental (ZMPA) y su capacidad para el control de inundaciones (Cruz-Solano et al., 2017). Esto ha significado un deterioro ambiental y paisajístico, el cual afecta la Estructura Ecológica Principal (EEP). Paralelamente, el manejo inadecuado de dichos residuos han promovido la presencia de sitios de disposición final ilegales, que provocan no solo obstrucciones en ríos,

terrenos y vías públicas, sino, también riesgos directos e indirectos sobre la salud humana y elevados costos de mantenimiento y restauración ambiental (Cortés, 2019).

De acuerdo con cifras presentadas por la SDA, el comportamiento de los RCD generados en Bogotá entre junio de 2016 y junio de 2019 fue el siguiente (SDA, 2019):

Grafica 1. Comportamiento de los RCD generados en Bogotá – junio de 2016 a junio de 2019



Fuente: (SDA, 2019)

Se observa entonces que, del total de RCD generados en Bogotá en 3 años (37'017.275 de toneladas), fueron llevados a disposición final un 84% (30'937.837), y tan solo un 16% han sido reutilizados o reciclados (6'079.438), considerándose un porcentaje muy bajo dado el potencial de aprovechamiento que normalmente tienen este tipo de residuos.



Con respecto a la normatividad existente para el manejo de estos residuos en el Distrito Capital, esta presenta vacíos en su configuración por la ausencia de incentivos que involucre el total de actores que participan en el manejo de los RCD y la conformación de una metodología tarifaria coherente a los sitios de disposición final y centros de tratamiento y aprovechamiento conforme al impacto ambiental negativo ocasionado por su funcionamiento, lo cual dificulta la reutilización, reciclaje y conciencia ambiental en las obras de infraestructura. Así mismo, es necesario acompañar la legislación con documentación científica que soporte técnicamente el uso de este tipo de materiales.

De acuerdo con lo anterior, es pertinente llevar a cabo una investigación que articule los factores que inciden en la gestión de los RCD a través del uso de herramientas dinámicas, modelación y construcción de escenarios, que permitan desde la toma de decisiones hasta la formulación de lineamientos reducir los impactos negativos causados en los sistemas social, económico, cultural y ambiental por el inadecuado manejo de estos residuos.

## 1.2 Justificación

El impacto ambiental negativo que están generando los RCD en la ciudad de Bogotá D.C. es elevado, tan solo entre los años 2016 y 2019, se generaron 37'017.275 toneladas de RCD, de las cuales fueron aprovechadas tan solo el 16% (SDA, 2019); considerando que hoy por hoy existen países como Holanda que aprovechan el 90% de sus residuos (Barroso, 2013), se infiere que hay una importante oportunidad de optimización a nivel de gestión de RCD. En el caso de España se identifican estrategias (planes de manejo, técnicas de recogida y segregación, además de reutilizar, reciclar y reducir) para implementar en la cadena de valor de los RCD, con el fin de reincorporar estos residuos en los procesos constructivos que se llevan a cabo y así disminuir la cantidad de disposición (López Ruiz et al., 2020).

Como se puede observar, los países europeos en general, han venido introduciéndose a la economía circular; sin embargo, se observa que, en Colombia, por tradición, los materiales utilizados en los procesos constructivos se han venido manejando bajo un sistema de producción lineal, en el cual los insumos son utilizados una única vez para ser posteriormente desechados. La generación, gestión y disposición inadecuada de los RCD, se convierte en un gasto y pérdida para las industrias, pues esto se constituye como una ineficiencia del proceso productivo si se considera que una parte importante de los RCD pueden ser aprovechados. La vinculación de criterios de economía circular genera grandes impactos en el sector constructor, dado que este actualmente presenta niveles de productividad y eficiencia bajos en términos de consumo de recursos; sin embargo, también se destaca que es un sector con un gran potencial y oportunidades de reinsertar en la cadena productiva importantes cantidades de recursos materiales (CORFO, 2020). Se exalta entonces que, siendo la sostenibilidad el principal foco de impacto en la gestión adecuada de RCD, la economía circular se constituye como el principal mecanismo para lograr dicho propósito.

Si bien Kabirifar coincide con que es importante implementar estrategias de reutilización y reciclaje para direccionar la industria de la construcción hacia un enfoque de economía circular, es pertinente tomar en cuenta las necesidades de las partes interesadas, el

ciclo de vida del proyecto y herramientas de gestión (Kabirifar et al., 2020). Herramientas como la dinámica de sistemas la cual nos permite realizar modelos de simulación con el fin de observar el comportamiento futuro de diferentes variables. Con base en estos modelos de simulación Hao et al., (2007) desarrolló estrategias de gestión de los RCD en Hong Kong y Wang & Yuan, (2009) simularon el sistema de gestión de estos residuos en China (Wang & Yuan, 2009). Ambos autores concluyen que es una herramienta que permite la toma de decisiones debido a su complejidad, permitiendo la interrelación de diferentes variables de aspectos económicos, ambientales, sociales y la simulación de escenarios futuros.

Es importante destacar que el enfoque de economía circular favorece la sostenibilidad, generando un equilibrio social, económico y ambiental, dado que no solo aporta a la optimización de dinero en la industria, sino que también causa efectos favorables a nivel ecológico ya que se disminuye significativamente la generación de residuos sólidos que terminan afectando el equilibrio ecosistémico; así mismo, es posible experimentar un impacto transitivo en el favorecimiento de la calidad de vida de las personas que podrán disfrutar de entornos más sanos. Se puede inferir entonces que la gestión adecuada de los RCD bajo un enfoque de economía circular, se constituye como un proceso equitativo, soportable y viable, y en esta medida, sostenible. Por otra parte, vale la pena mencionar también que, en el desarrollo de obras de infraestructura, se generan otros tipos de residuos como el cartón, la madera y plásticos, entre otros, que, si bien se producen en cantidades mucho menores, también pueden ser aprovechados y sometidos a ciclos de aprovechamiento propios de su tipología.

Para finalizar, se destaca el hecho que en la actualidad, el distrito tiene un importante reto que es ejercer un adecuado control sobre aproximadamente 32.000.000 de toneladas de RCD, esto con el propósito de mitigar el impacto que dichos residuos están causando en la Estructura Ecológica Principal de la ciudad y que han venido causando grandes daños y pérdidas en los ecosistemas del Distrito Capital; se espera que el control sobre la gestión de estos RCD, favorezcan la protección del aire, el agua y los suelos, ya que la contaminación en estos recursos se constituye como factor de riesgo para la salud de la población (SDA, 2018).

### **1.3 Propósito del proyecto y pregunta de investigación**

La presente investigación tiene como propósito, plantear lineamientos que permitan mejorar la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá D.C., a partir de una revisión sistemática de información nacional e internacional y desarrollo de un modelo de simulación sostenible, que utilice datos de la gestión de proyectos de infraestructura vial, por tratarse de una tipología de proyectos, que constantemente está generando volúmenes de RCD desde el sector público.

La revisión sistemática permite evidenciar los procedimientos y estrategias que demuestran la apropiada gestión de los RCD a nivel nacional e internacional, con el fin de recolectar, filtrar y organizar la información existente. Así mismo, identificar las brechas y oportunidades frente a la gestión desarrollada por parte del Distrito Capital y con ello formular lineamientos contextualizados que transformen los procedimientos ejecutados.

Apoiados en un modelo de simulación sostenible que permita la integración de variables económicas, ambientales y sociales, se formulan escenarios futuros sostenibles sobre la gestión de los RCD. Este modelo de simulación es replicable, flexible y adaptable a los diferentes actores que inciden en la gestión de los RCD en obras de infraestructura vial, es decir, permite modificar los datos ingresados para el desarrollo de escenarios posteriores a los simulados y puede ser manipulado por cualquier persona que tenga conocimientos sobre el funcionamiento de la dinámica de sistemas y acceso a dicho modelo. Para ello en este caso, se requiere el uso de un software de simulación como herramienta para organizar, realizar y simular las variables que permitan abarcar la problemática en estudio. El modelo diseñado, puede aplicarse a proyectos de obras civiles en cualquier escala, sin embargo, es preciso saber que se debe contar con la información suficiente con relación al proyecto, para que la simulación arroje resultados de valor que puedan ser empleados para la toma de decisiones.

La presente investigación se enfoca en estudiar el comportamiento de la gestión de los RCD para formular lineamientos que optimicen la administración de los mismos, con el fin de disminuir su disposición y maximizar su aprovechamiento en la ciudad de Bogotá D.C.

## **Pregunta de Investigación**

¿Qué lineamientos podrían mejorar la gestión de residuos de construcción y demolición en obras de infraestructura vial desarrolladas en Bogotá Distrito Capital, de manera sostenible?

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Proponer lineamientos que mejoren la gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de infraestructura vial desarrolladas en Bogotá Distrito Capital para contribuir a la sostenibilidad.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analizar los procedimientos y estrategias existentes en el marco nacional e internacional frente a la gestión de los RCD, identificando aquellas que se puedan adaptar al contexto de Bogotá.
- Determinar el efecto de estrategias para la gestión de RCD a partir de escenarios de simulación que integren variables de sostenibilidad para mejorar la gestión futura de estos materiales en Bogotá.
- Formular lineamientos que permitan mejorar la gestión de los residuos de construcción y demolición en obras de infraestructura vial desarrolladas en Bogotá, contribuyendo a la sostenibilidad.

### 3 MARCO DE REFERENCIA

Como parte de este capítulo se presenta el marco conceptual, donde se encuentra la definición de algunos términos indispensables para la comprensión de la investigación. Posteriormente, en el marco teórico se encontrarán algunas bases teóricas que permiten establecer la relación de la sostenibilidad con el desarrollo industrial de la construcción y el impacto de la dinámica de sistemas en la toma de decisiones. Por otra parte, se encuentra el marco normativo que contiene el análisis de legislación de mayor relevancia en el manejo de los RCD. Para cerrar se elabora un marco de antecedentes en el cual se hace una revisión de avances investigativos existentes sobre la gestión de este tipo de residuos.

#### 3.1 Marco Conceptual

En el siguiente apartado se presentan algunos conceptos considerados como base elemental para el desarrollo de la investigación, intentando abordar temas que van de lo general, como la gestión de residuos, a lo particular, como el aprovechamiento.

##### 3.1.1 Gestión de Residuos sólidos

Los residuos sólidos son aquellos materiales, sustancia o elementos que resultan del uso o consumo de bienes, bajo un contexto doméstico, comercial, industrial, institucional u otros que llevan a la generación de objetos de desecho (Aguilar, 2009). Los residuos sólidos están clasificados en (2) grandes grupos que se describen a continuación:

- **Residuos aprovechables:** Son aquellos desechos que tienen el potencial de ser usados para fines diferentes para los cuales fueron empleados inicialmente, extendiendo su ciclo de uso y reduciendo la necesidad de adquirir nuevos productos. Aquellos residuos que no tienen el potencial de ser re-aprovechables se denominan basuras (Aguilar, 2009).
- **Residuos no aprovechables:** Los residuos no aprovechables son aquellos materiales o sustancias solidas o semisólidas, de origen orgánico e inorgánico, putrescible o no, proveniente de actividades domésticas, industriales,

comerciales, institucionales, de servicios, que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación en un proceso productivo. Son residuos sólidos que no tienen ningún valor comercial y requieren tratamiento y disposición final, por lo tanto, generan costos de disposición. (Aguilar, 2009).

De acuerdo con el concepto de Aguilar (2009), la capacidad adquisitiva de las personas es directamente proporcional a su nivel de generación de residuos. Para mitigar los efectos de la alta producción de residuos que se presenta hoy en día, es pertinente sensibilizar sobre las llamadas tres R, (Reducir, Reutilizar y Reciclar), esto debido a que gran parte de la disposición final de los residuos en Colombia, ha generado graves problemas de impacto ambiental en las aguas superficiales y subterráneas.

Conforme a lo anterior, el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en su Guía: “Selección de Tecnologías de Manejo Integral de Residuos Sólidos” emitida en el año 2015, señala que los problemas más frecuentes de manejo inadecuado de los residuos sólidos son:

- Pérdida del potencial de utilización de los residuos.
- Gestión parcial de los residuos sin considerar el impacto ambiental posterior a su recolección y transporte.
- Prácticas inadecuadas de disposición final en relación con localización, construcción, y operación de los botaderos y rellenos sanitarios.
- Ausencia del conocimiento sobre la magnitud del problema.
- Falta educación y participación respecto al manejo ambiental de residuos.

Entonces, una gestión adecuada de los residuos sólidos permite no solo optimizar las inversiones, sino también mitigar el impacto ambiental en el marco de los límites permisibles conforme con las leyes y normativas aplicables y vigentes. Dicha gestión debe estar estipulada dentro de los criterios de sostenibilidad por lo que debe seguir las siguientes pautas:



- Se tiene que reducir a un mínimo la producción de residuos en el punto de generación de los mismos.
- Hay que segregar los residuos y recuperar las fracciones que sean susceptibles de reciclarse y reutilizarse.
- Es necesario realizar una valoración energética de los residuos no considerados en el apartado anterior.
- Posteriormente se deben eliminar los residuos no recuperados después de aprovechar su contenido energético evitando cualquier impacto negativo sobre las personas y el ambiente (Montes Ponce de Leon, 2001).

Cuando se aborda la administración de residuos sólidos, se debe analizar todo su ciclo, que va desde el punto donde se generan hasta el punto de su disposición final; dicho ciclo se describe a continuación:

- *Producción.* Cuando un material ya no tiene valor para su dueño se considera residuo o desecho.
- *Procesamiento.* Este procesamiento puede incluir lavado, separación y almacenamiento para reciclar una parte del residuo.
- *Recolección del residuo.* Involucra la recolección de los residuos sólidos, el vaciado en los recipientes y el transporte en vehículos adecuados para tal fin. Posteriormente, el residuo recolectado se puede transferir a una instalación central de almacenaje o a una instalación de reprocesamiento. El procesamiento suele incluir reducciones de masa y de volumen, junto con la separación de los diversos componentes susceptibles de ser reutilizados. El residuo separado en este punto, se vuelve un artículo de valor, de hecho, deja de ser un residuo. La parte orgánica del residuo se puede transformar en calor por medios químicos (normalmente incineración) o en gas combustible o en abono (mediante reacciones mediadas biológicamente).
- *Transporte y disposición.* El método más común de disposición final es el relleno sanitario (Mackenzier, 2005).

### **3.1.2 Residuos de construcción y demolición - RCD**

Se constituyen como RCD aquellos que son generados en el entorno urbano y no son parte de los Residuos Sólidos Urbanos, cuyos puntos de generación son los domicilios y comercios, considerando que su composición es cuantitativa y cualitativamente diferente. De acuerdo con lo anterior, los RCD son residuos generados en obra los cuales se caracterizan por ser básicamente inertes, esto incluiría las tierras y áridos mezclados, piedras, residuos de hormigón y de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, maderas, entre otros. Los RCD se producen en actividades tales como descapotes, excavaciones, explanaciones, demoliciones, levantamiento de estructuras y obra negra, instalaciones, obra gris, acabados, limpieza en áreas de trabajo y almacenamiento que constituyen procesos constructivos y deconstructivos (Tapias, 2017). Por su parte, la SDA define los RCD como todo residuo sólido sobrante de las actividades de demolición, excavación, construcción y/o reparación de las obras civiles o de otras actividades conexas (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014).

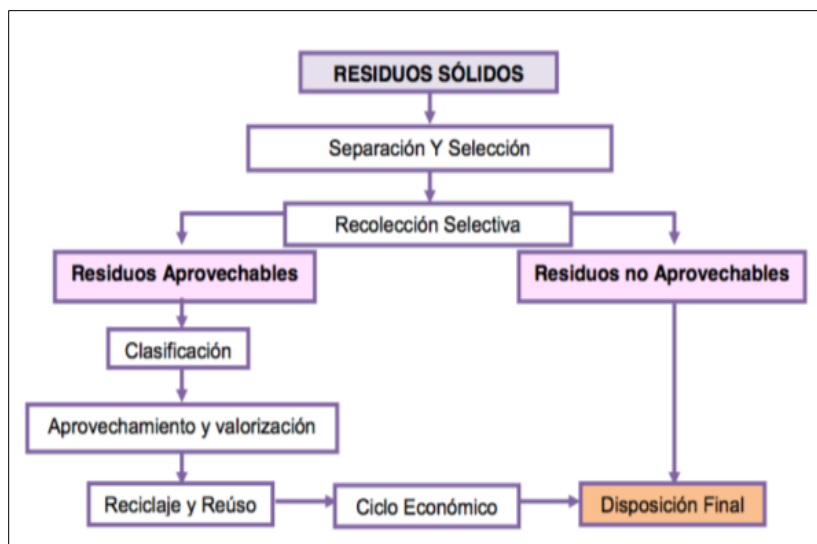
### **3.1.3 Sistemas de gestión integral de residuos sólidos (SGIRS)**

La Gestión Integral de Residuos Sólidos hace referencia a todas aquellas operaciones y disposiciones direccionadas a dar a los residuos producidos una destinación, y a la vez adecuada, para evitar que estos generen impactos ambientales negativos y destructivos al entorno.

Dicha gestión se realiza en función de sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento, posibilidades de recuperación, aprovechamiento, comercialización y disposición final (Republica, 2002). Este sistema reconoce diferentes momentos o etapas, actores y roles que operan en función del manejo como modelo diferenciador de los residuos sólidos que se generan, permitiendo la salida de los residuos no aprovechables hacia la disposición final y facilitando la recuperación y el aprovechamiento de los residuos reciclables y/o reintegrables a la cadena productiva.

En la figura 1 que se presenta a continuación, se puede observar un esquema sobre el proceso que debe ser llevado a cabo para la gestión integral de los residuos sólidos.

Figura 1. Esquema Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos



Fuente: (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Las etapas del sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) son: la generación, la separación en la fuente o desde los hogares, la recolección selectiva, el transporte interno, la clasificación, el acopio o almacenamiento temporal, la entrega final a las rutas selectivas, el servicio de aseo para el aprovechamiento y la disposición final.

### 3.1.4 Aprovechamiento de RCD

El aprovechamiento se constituye como un proceso que permite la recuperación de los materiales provenientes de los residuos de construcción y demolición, se realiza su reincorporación al ciclo económico productivo en forma ambientalmente eficiente por medio de procesos como la reutilización y el reciclaje (Res. SDA 01115, 2012). El proceso de reutilización se asocia a la reintegración de los residuos a la cadena productiva sin que estos sufran modificaciones; mientras que, el reciclaje, hacer referencia al aprovechamiento de un residuo que debe ser transformado para reintegrarse a la cadena de producción o consumo (Sanmartín Ramón et al., 2017).

## **3.2 Marco Teórico**

El marco teórico que se presenta a continuación tiene el propósito de establecer la relación de la sostenibilidad y el desarrollo industrial, el cual requiere tener en cuenta los principios económicos, ecológicos y sociales que intervienen en la construcción de vías de la ciudad de Bogotá. De esta manera a continuación se presentan algunas bases teóricas y conceptuales que aplican al proceso investigativo.

### **3.2.1 Desarrollo sostenible (DS)**

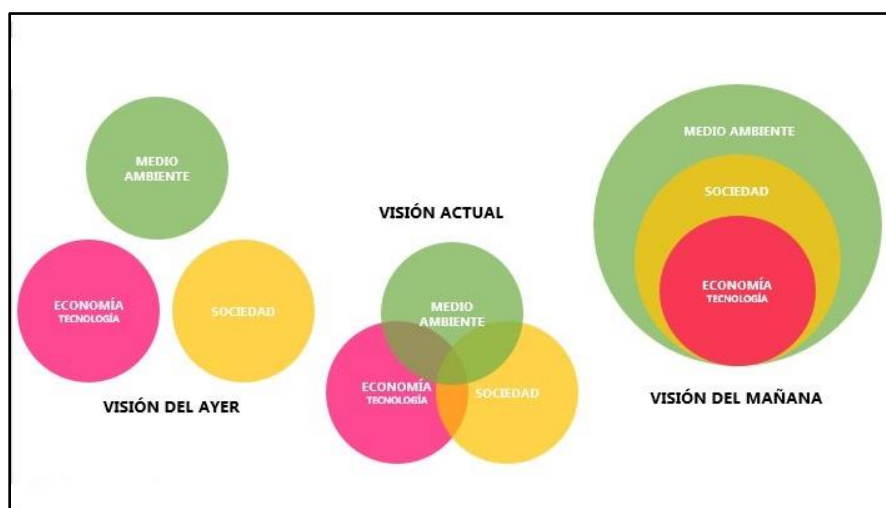
El concepto de ambiente se refiere al conjunto de todos aquellos factores que determinan la influencia del ser humano en los aspectos físicos, químicos y biológicos externos (Alfonso, 2003). En la actualidad, se considera que el ambiente no puede ser concebido como un simple espacio en habitado por el ser humano, sino que también integra componentes sociales, naturales y culturales; en otras palabras, la teoría contemporánea ha pasado de asociar el ambiente a la simplicidad de sus elementos básicos (físicos, químicos y biológicos), a una concepción holística en la que se vinculan las interacciones que se generan en la dinámica del entorno natural, asociando vertientes económicas y socioculturales. De acuerdo con lo anterior, en la actualidad se identifican como ambientales no sólo los problemas clásicos relativos a contaminación o al deterioro de la naturaleza, sino también otros más ligados a cuestiones relacionadas con el modelo de desarrollo social (Sgreccia & Tortoreto, 2005).

El desarrollo sostenible refiere a la capacidad de cubrir las necesidades actuales de la sociedad, sin poner en riesgo el patrimonio ecológico de las generaciones venideras (Rojo, 1991). La armonía entre el hombre y el entorno natural conlleva necesariamente el abordaje del desarrollo sostenible, ya que este concepto asocia las condiciones necesarias para generar una interacción equilibrada entre el hombre y su entorno. En la búsqueda por lograr las condiciones anteriormente descritas, la comunidad internacional ha venido generando mayor interés en estudiar progreso económico y social y sus efectos inmediatos sobre el medio

natural (Artaraz, Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible, 2002), dicho interés se ha venido agudizando desde las últimas décadas el siglo XX, dado que desde aquel entonces se ha empezado a reconocer que el desarrollo sostenible es el único enfoque de desarrollo que permitiría asegurar la calidad de vida de las generaciones futuras.

Se puede decir entonces que cuando se habla de desarrollo sostenible, se hace alusión a la capacidad que tiene una comunidad de cubrir sus propias necesidades sin poner en peligro los recursos y posibilidades de futuras generaciones. A través del desarrollo sostenible, se busca integrar y asociar las dimensiones económica y social con la dimensión ecológica, tal y como se puede observar en la figura que se presenta a continuación.

Figura 2. Desarrollo sostenible (DS)



Fuente: (Hedstrom, 2018)

En la figura 2 se puede observar el progreso en la visión del DS, donde, en el ayer, se establecía que el ambiente, la economía y sociedad eran entendidos y manejados de manera independiente, ahora se reconoce que para que exista un desarrollo sostenible, se debe generar un equilibrio en el cual estas 3 variables puedan operar sin que alguna de ellas genere impactos negativos sobre las otras; y, finalmente, establece la mirada del mañana en donde las industrias operan dentro de una sociedad sin limitación, que a su vez opera en el planeta y dentro de reglas básicas de la naturaleza del ambiente (Hedstrom, 2018). Es por esto que,

actualmente para que exista el concepto de sostenibilidad, debe existir un equilibrio e integración armónica entre los niveles ambientales, económicos y sociales, ya que solo así es posible lograr que cualquier tipo de actividad humana que impacte el ambiente sea soportable, viable y equitativo.

El concepto de desarrollo sostenible surgió en respuesta de los evidentes los efectos adversos causados sobre el medio natural a partir de las actividades desarrolladas en las industrias (Artaraz, Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible, 2002), y se ha venido fortaleciendo en los territorios a través de la imposición de diferentes tipos de normativas que obligan a las empresas a realizar su propia gestión ambiental.

### **3.2.2 Desarrollo de la industria y Contaminación ambiental.**

Con el desarrollo acelerado de la industria y la tecnología, la sociedad moderna ha incrementado significativamente el rastro de contaminación, lo cual ha causado un impacto en el ambiente tan significativo, que la capacidad de auto purificación de la naturaleza ha sido insuficiente; se puede decir entonces que la contaminación es uno de los principales efectos adversos del desarrollo industrial, y está definida como la presencia de sustancias o formas de energía que alteran el bienestar y la salud de las personas, así como la integridad de la flora y/o fauna. Por su parte, Artaraz (2002) define la contaminación ambiental como la introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes a los que no pertenecen, o en cantidades superiores a las propias de dichos ambientes, que interfieren con la salud y la comodidad de las personas, dañan los recursos naturales o alteran el equilibrio ecológico de la zona.

De acuerdo con lo anterior, actividades orientadas al desarrollo social como las obras civiles, pueden generar una serie de residuos que, si no son gestionados adecuadamente, generan alteraciones significativas en el ecosistema, es por esta razón que la gestión de residuos se convierte en una necesidad, principalmente cuando se experimentan desarrollos acelerados en términos de infraestructura.

### 3.2.3 Gestión de RCD en la unión europea

La industria del reciclaje de RCD en la comunidad europea empieza a desarrollarse en los inicios de los años 80 en Alemania, en donde se crean las primeras guías técnicas de áridos reciclados, los cuales iniciaron a emplearse principalmente en construcción de bases de carreteras y vías urbanas. Ya llegado el año 93 empezó a desplegarse un marco regulatorio para el uso de los RCD en obras públicas, lográndose evidenciar una buena relación entre calidad y precio, lo que ha venido fortaleciendo progresivamente dicha industria. Si bien Alemania fue país pionero en Europa en el tema de reutilización y reciclaje de RCD, hoy por hoy no destaca entre los primeros países recicladores de RCD (Barroso, 2013).

En la tabla que se presenta a continuación, se evidencian los países de la comunidad europea comparando los porcentajes de RCD reciclados o reutilizados, y los porcentajes que son incinerados o vertidos.

Tabla 1. Porcentaje de reúso o reciclaje en la Unión Europea.

Estado miembro	% Reutilizado o Reciclado	% Vertido o incinerado
Alemania	17	83
Reino Unido	45	55
Francia	15	85
Italia	9	91
España	<5	>95
Holanda	90	10
Bélgica	87	13
Austria	41	59
Portugal	<5	>95
Dinamarca	81	19
Grecia	<5	>95
Suecia	21	79
Finlandia	45	55
Irlanda	<5	>95
Luxemburgo	N.A	N.A

Fuente: (Barroso, 2013).

Se puede observar en la tabla 1, que los países que más reciclan o reutilizan son Holanda y Bélgica, España, Portugal, Grecia e Irlanda. Destaca que Holanda ha llegado a un

importante porcentaje de aprovechamiento de RCD, dado que desde el año 1997 prohíbe el vertido de RCD reciclables. Así mismo, se exalta que Alemania cuenta con una ley llamada “Ley de Ciclos” que expresa que los RCD recuperables no deben de ser vertidos, en Finlandia existe también una prohibición de verter este tipo de residuos mezclados desde 1998; y, finalmente, destaca también que Austria obliga por ley a separar y reciclar los RCD desde 1993.

### **3.2.4 Gestión de los RCD en Latinoamérica**

A nivel de Latinoamérica, existen avances mucho más limitados en gestión de RCD respecto a Europa, pues dicha región se caracteriza por tener sus poblaciones concentradas principalmente en las ciudades capitales (aproximadamente un 80% del total de la población), generando grandes concentraciones de este tipo de residuos que, a causa de su inadecuada gestión, terminan en las cuencas de los ríos que son usadas como vertederos, poniendo en evidencia importantes problemas ambientales derivados de una mala planificación en términos de reúso y reciclaje, y una deficiente disposición final (Suarez, Betancourt, Molina, & Mahecha, 2019). En términos generales, en América Latina el 90% de los residuos no son aprovechados (ONU, 2018).

### **3.2.5 Gestión de los RCD en Bogotá**

#### ***3.2.5.1 Principios para la gestión de los RCD.***

La SDA define también unos principios que buscan fundamentalmente realizar una adecuada gestión en obra; dichos principios se relacionan a continuación:



Figura 3. Principios rectores de la gestión de RCD



Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015)

La figura 3, expresa en orden jerárquico los principios de la gestión de RCD, estableciendo como principal la reducción; una vez se generen estrategias para disminuir la generación de este tipo de residuos, se procede a determinar el potencial de aprovechamiento de los mismos para su reutilización y reciclaje. Finalmente, aquellos residuos que no puedan ser aprovechados, tendrán que manejarse a través de un adecuado proceso de disposición final.

La reducción se logra mediante adopción de prácticas como la prevención desde la misma gestión, tales como las que se presentan en la tabla 2 (Tapias, 2017).

Tabla 2. Estrategias de reducción

Descripción	
Estrategias de reducción	Realizar una adecuada coordinación de los suministros y transporte de materiales, con el propósito de reducir las pérdidas y evitar mezclas indeseables.
	Hacer un reconocimiento desde la planeación del proyecto de los gestores autorizados de residuos (ordinarios, peligrosos, RCD, entre otros).
	Asegurarse de contar con todas las herramientas y equipos necesarios para en desarrollo adecuado de las actividades en la obra.
	Efectuar una descarga ordenada, y organizar adecuadamente materiales y elementos.
	Establecer de manera anticipada los volúmenes y la naturaleza de los residuos que se van a generar en las actividades constructivas y de demolición.

	Hacer una evaluación de las características (condiciones de admisión, distancia y tasas) de los centros de clasificación, de los lugares de disposición final, así como de los recicladores, entre otros, para determinar los escenarios y actores externos más adecuados para la gestión de los RCD.
	Generar los mecanismos necesarios para garantizar que los materiales susceptibles de aprovechamiento no se mezclen con otro tipo de materiales, en especial con los peligrosos.
	Optimizar la organización de los lugares de trabajo
	Manejar el suministro de materiales a través de sistemas de estandarización.
	Identificar los lugares más adecuados para el almacenamiento temporal de los reutilizar y los que están pendientes por disponer en sitios de disposición final de RCD, de acuerdo con las características particulares de la obra, de modo que se garantice una adecuada señalización y cubierto para evitar la acción erosiva del agua y el viento en los elementos potencialmente aprovechables.
	Los residuos deben ubicarse en zonas identificadas y destinadas a la clasificación desde el origen.

Fuente: (Tapias, 2017).

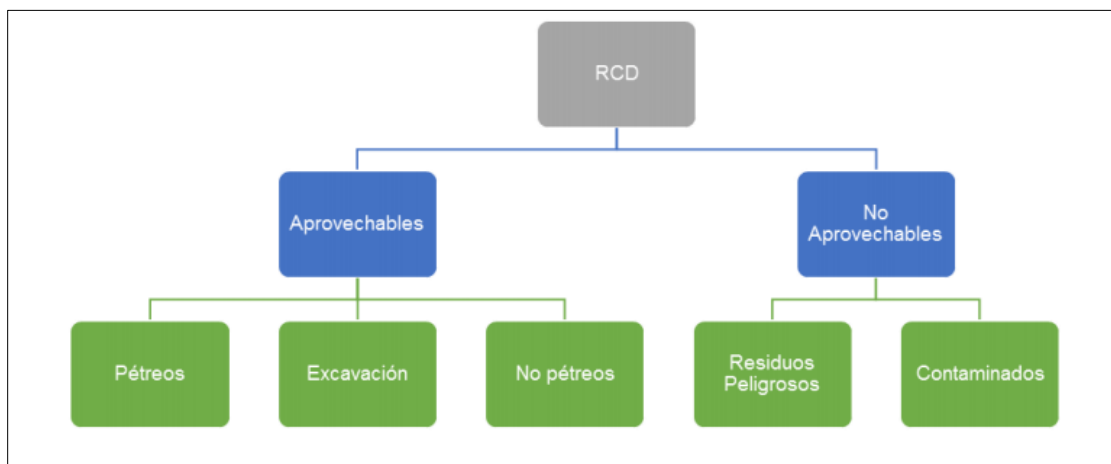
Como segundo principio rector, la SDA establece el aprovechamiento, el cual consiste fundamentalmente en la recuperación de materiales de RCD productos de las actividades de obra, para su reincorporación a otros ciclos productivos de la construcción a través de mecanismos como la reutilización y el reciclaje. Para lograr promover el aprovechamiento como principio de la gestión de RCD, es necesario, en primera medida, generar un reconocimiento entorno al impacto ambiental que esta actividad, así como sobre los beneficios económicos que trae consigo la caracterización y el establecimiento de su potencial de reutilización; a este proceso se le conoce como “valorización de los RCD”; en otras palabras, se puede decir que el aprovechamiento de los RCD genera impactos ambientales y económicos positivos, en la medida en que esto permitiría disminuir la compra de materias primas convencionales (ahorro de dinero), materias que son extraídas de la biósfera y que, por ende, generan desequilibrios ecosistémicos (disminución de las afectaciones sobre los recursos naturales). Por otra parte, es pertinente destacar que el aprovechamiento de los RCD puede darse desde dos perspectivas, la del reúso, y la del

reciclaje (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016); entendiendo por Reúso la prolongación de la vida útil de los RCD, sin que estos tengan que sufrir procesos de transformación, como por ejemplo, las losas de concreto las cuales pueden ser reincorporadas como material de rajón, la demolición de pavimento asfáltico fresado para el mantenimiento y conservación de las vías; por otra parte, el reciclaje se fundamenta en la transformación del RCD, siendo empleado como materia prima para la elaboración de otros productos finales tales como los prefabricados reciclados, sub-bases granulares entre otros.

Para determinar si los RCD son potencialmente reutilizables o reciclables, es necesario que estos atraviesen primero por un proceso de clasificación, tal y como se describe a continuación.

Una parte de la gestión adecuada de los RCD es la clasificación de estos de acuerdo con su potencial de aprovechamiento; con el propósito de facilitar un manejo adecuado de los RCD a los generadores y considerando el marco normativo vigente, la SDA define los siguientes parámetros de clasificación:

Figura 4. Clasificación de los Residuos de Construcción y Demolición



Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015)

De acuerdo con la figura anterior, los residuos *aprovechables* se clasifican en residuos pétreos, los cuales abarcan residuos tales como el hormigón, arenas, gravas, gravillas, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos. Por otra

parte, los residuos de excavaciones vinculan tierras negras, arcillas, bentonitas y similares. También se encuentran los tipos de residuos no pétreos, que integran residuos tales como vidrios, aceros, hierros, madera, plásticos, metales, cartones, yesos, dry Wall y similares.

En cuanto a los residuos *no aprovechables* de excavación y demolición, se contemplan los residuos peligrosos, que son todos aquellos relacionados en el decreto 4741 de 2005 tales como el asbesto cemento, amianto, biosanitarios, entre otros; y los residuos contaminados que contemplan aquellos que por alguna razón fueron expuestos a elementos contaminantes, razón por la cual dejan de ser aprovechables.

Por su parte, (Tapias, 2017) establece algunas acciones estratégicas a nivel de aprovechamiento de los RCD (estrategias de reuso y reciclaje):

Tabla 3. Estrategias de reuso

Descripción	
Estrategias de reuso	Las tierras no reutilizables en la misma obra deben retirarse por un transportador registrado y capacitado, según lo expresado por el ministerio de ambiente o la administración municipal.
	La arena, grava, y demás áridos, pétreos, cerámicos, concreto y cemento pueden ser empleados como base para carreteras y para nivelar y estabilizar suelo y terraplenes.
	Los residuos de la construcción se reusarse siempre que no hayan sido mezclados con materia orgánica, plásticos, maderas, papel, hierro o sustancias peligrosas. No se permite la reutilización in situ de RCD sin previa clasificación (ordinarios, especiales y peligrosos).
	Los materiales susceptibles de reutilización son: vigas, pilares, falsos techos, cerchas, elementos prefabricados, puertas, ventanas, revestimientos prefabricados, tejas, estructuras ligeras, soleras, claraboyas y chapas, barandillas, pavimentos sobrepuestos, piezas de acabado y mobiliario de cocina.

Fuente: (Tapias, 2017).

Tabla 4. Estrategias de reciclaje

Descripción	
Estrategias de reciclaje	Cada material debe ser reciclado de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas y del destino que éste vaya a tener.
	Se recomienda consultar diferentes alternativas de reciclaje para cada material determinando en cual se puede generar mayor aprovechamiento, menor costo, menor impacto ambiental, entre otros.
	Los materiales de origen pétreo pueden reincorporarse a su ciclo productivo mediante un proceso de trituración y cribado, con la ubicación de una planta móvil en frentes de obra.

Fuente: (Tapias, 2017).

Como último recurso en el proceso de gestión de los RCD, figura la disposición final (tercer principio), que, si bien se busca que se de en la menor proporción respecto a las alternativas de reducción y aprovechamiento, es necesario reconocer que hay tipos de residuo que no pueden ser reutilizados o reciclados por razones anteriormente expuestas, pero sobre los cuales sí se debe garantizar una gestión adecuada y controlada, de acuerdo con las normas vigentes.

Para la disposición final, (Tapias, 2017) también genera las siguientes recomendaciones:

Tabla 5. Estrategias de disposición final

Descripción	
Estrategias de disposición final	Evitar el estacionamiento en vía pública ni obstrucción de tránsito en las labores de carga y descarga; para ello, se debe contar la señalización necesaria.
	El generador de RCD debe asegurarse que el sitio de disposición final esté autorizado, esto se puede determinar mediante la existencia de una resolución que otorgue concepto de viabilidad ambiental y le permita prestar el servicio.
	El sitio de disposición final se obliga a contar con una certificación de los volúmenes dispuestos, y, además, debe contar con la información relacionada a la fecha e identificación del proyecto al que le reciben los RCD.

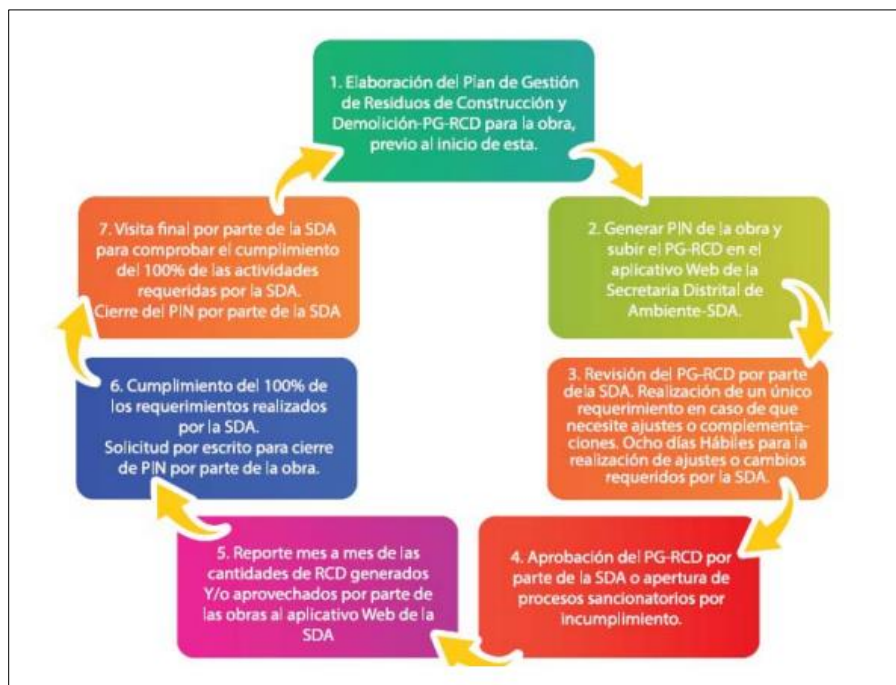
Fuente: (Tapias, 2017).

### 3.2.5.2 Lineamientos para la gestión de RCD en Bogotá

De acuerdo con lo establecido en la resolución 932 del 9 de julio de 2015, en conjunto con la resolución 01115 de 2012, se establece la obligatoriedad de la formulación y ejecución de un plan de gestión de residuos de construcción y demolición (PGRCD), para todas aquellas obras de construcción que cumplan una de las siguientes condiciones: que la obra constructiva abarque áreas superiores a los 5000 metros cuadrados, o que se convierta en generador además de 1000 metros cúbicos de RCD.

Para ejercer control sobre el cumplimiento de estas normas, la SDA de Bogotá, ha dispuesto una herramienta web, que tiene como propósito el seguimiento a los grandes generadores por medio de un sistema de registro y reporte con periodicidad mensual, el cual opera de acuerdo con la siguiente gráfica:

Figura 5. Pasos para elaborar y reportar el Plan de Gestión de RCD a la SDA.



Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015)

De acuerdo con la figura 5, el proceso de reporte se divide en 7 fases, la primera de ellas orientada a la elaboración del PGRC por parte del generador, una vez elaborado dicho plan, es posible pasar a la siguiente fase que involucra la generación de un pin de la obra que permitirá cargar en la plataforma el PGRCD, posteriormente se procede a la revisión del plan formulado por parte de la SDA, el cual recibirá retroalimentación en caso de ser necesario, y se dispone de un tiempo límite para que el generador realice los ajustes sugeridos al PGRCD, y a partir de ello poder pasar a la fase 4 que involucra la aprobación del mismo, o en su defecto la apertura de procesos sancionatorios cuando no se da cumplimiento al reporte o a las observaciones; una vez aprobado se da paso a la fase 5, que involucra el reporte mensual de las cantidades de RCD generados en la obra, especificando los volúmenes que están siendo aprovechados. Una vez cumplidos los pasos anteriormente descritos, es posible iniciar el proceso de cierre del pin a través de una solicitud por escrito, y como fase séptima final, se programa una visita por parte de la SDA cuyo propósito es verificar el cumplimiento en un 100% de las actividades que en el proceso haya exigido la entidad, una vez verificado se procede al cierre del pin por parte de la (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

### **3.2.6 Actores vinculados a la cadena de gestión de RCD.**

**Generadores.** los RCD son generados por personas naturales o jurídicas vinculadas a actividades propias a la construcción y demolición, en esta medida, como productores son directamente responsables de dar una adecuada gestión a los mismos para que estos sean aprovechados, o en su defecto, tengan una disposición final enmarcada dentro de las normas ambientales establecidas a estos actores denominados generadores, se les puede clasificar en grandes o pequeños, de acuerdo con los volúmenes de RCD que producen. Se constituye entonces como gran generador aquel que produce volúmenes de RCD superiores a 1 metro cúbico mensual, o que requieren licencias de construcción para llevar a cabo sus actividades; mientras que los pequeños generadores son aquellos que generan volúmenes de RCD inferiores a 1 metro cúbico mensual, o aquellos que por la naturaleza de la obra que adelantan no requieren ningún tipo de licencia.

**Transportadores.** De acuerdo con lo expresado en la resolución 1115 del año 2012, los generadores de RCD deben separar en un espacio conocido como “punto limpio” los RCD

acuerdo con su clasificación, y disponerlos para su respectiva recogida por parte de los transportadores, destacando que dichos transportadores deben estar registrados ante las autoridades ambientales como organizaciones recicladoras, o empresas autorizadas para llevar a cabo los procesos de aprovechamiento. Como se mencionaba anteriormente, los transportadores de RCD deben cumplir con unas condiciones mínimas de nivel técnico que se exigen desde un ámbito normativo, y necesariamente deben estar registrados ante la SDA.

La labor fundamental de los transportadores consiste en movilizar los RCD desde el punto de generación hasta los Centros Tratamiento y Aprovechamiento (CTA) en los cuales se realizan las actividades propias de la clasificación, separación y tratamiento, así como también de almacenamiento temporal para los RCD que serán reusados o reciclados; o para los que deben ser llevados a sitios de disposición final (SDF), sitios que también deben contar con las autorizaciones de las instituciones ambientales competentes que avalarían su competencia para recibir y a copiar de manera definitiva los RCD que por sus características no puedan ser objeto de aprovechamiento (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

### **3.2.7 La dinámica de sistemas como eje articulador en la sostenibilidad y el sector de la construcción**

La dinámica de sistemas fue creada a mediados de la década de 1950 por el profesor Jay W. Forrester, una de sus principales ideas es que las organizaciones se describen mejor si se presta más atención a los flujos que lo controlan que a las entidades que lo hicieron (Forrester, 1969). El objetivo principal de esta temática es estudiar el comportamiento de los sistemas que muestran relaciones causa-efecto mediante diagramas de bucle causal o de flujo, los cuales permiten que se comprendan y formulen los múltiples mecanismos de retroalimentación, que guían el comportamiento del sistema (Degres et al., 2004).

La dinámica de sistemas es considerada un instrumento que define como base los principios de control y realimentación para abordar y entender la forma en la cual interactúan sistemas complejos (Oviedo, Leiva, Diaz, & Forradellas, 2013); en esta medida, una estructuración clara de un sistema y el entendimiento profundo de su dinámica hace posible

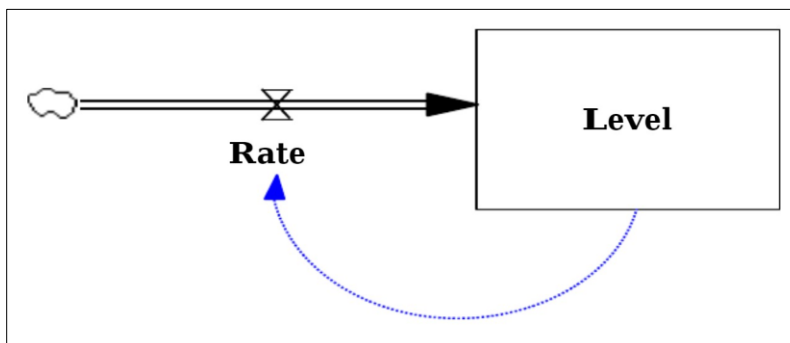


proyectar el impacto que genera la modificación de una variable sobre las demás que componen dicho sistema. La comprensión de la dinámica de los sistemas facilita entonces la toma de decisiones sobre un contexto de estudio (Castrillón & Valencia, 2018).

Existen diferentes herramientas que facilitan el modelado de los sistemas, sin embargo, todos operan bajo un mismo principio que es la definición del denominado “mapa sistémico” que no es más que el contexto objeto de modelado, a través del cual se hacen explícitos las variables e interrelaciones que se generan dentro del sistema en análisis. Este reconocimiento de las relaciones e interrelaciones que se generan entre las variables, permiten generar análisis desde una perspectiva de causa y efecto, logrando percibir las variaciones que se generan en el medio inmediatamente cercano, aportando los datos necesarios para decidir en torno a estrategias contundentes orientadas a la resolución de problemas, normalmente en sistemas de alta complejidad (Izquierdo, Galán, Santos, & Olmo, 2008).

Para crear un mapa sistémico, es necesario introducir variables de nivel, las cuales almacenan valores actuales resultado de la diferencia acumulada entre las entradas y las salidas; tasas o flujos, se encargan de transportar el contenido de un nivel a otro; funciones de decisión, controlan la tasa de flujo entre los niveles (dibujados como válvulas) y por último los canales de información, que conectan las funciones de decisión a los niveles, como se muestra a continuación.

Figura 6. Diagrama de flujo sencillo de la dinámica de sistemas.



Fuente: (Dangerfield, 2014).

Tal y como se observa, la dinámica de sistemas opera bajo un enfoque de causa-efecto, donde se integran múltiples variables que se correlacionan, y que permiten proyectar el comportamiento de las mismas, bajo condiciones específicas. Se considera que el uso de la dinámica de sistemas en el manejo de RCD, permiten determinar la respuesta de variables a la sostenibilidad cuando se incrementa o disminuye el aprovechamiento, develando datos relevantes para la toma de decisiones favorecedoras para el ambiente, la sociedad y la economía.

### **3.2.8 Gestión de RCD y su impacto en los Objetivos Desarrollo Sostenible (ODS)**

Antes de abordar de manera puntual los ODS, se considera pertinente introducir primero en el concepto y las bases del desarrollo sostenible; Barbara Mary Ward, fundadora del Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo, creó e introdujo el concepto de desarrollo sostenible, sin embargo, no fue hasta 1987 que el término desarrollo sostenible se define en el informe de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, también conocido como el “Informe Brundtland” (Duran et al., 2015). En dicha teoría se anuncia “... *atender a las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de atender a sus propias necesidades...*” (Brundtland, 1987).

Debido a que las preocupaciones globales aún están enfocadas en el lento crecimiento económico, las desigualdades sociales, los impactos negativos ambientales y el anhelo de la paz en todas sus dimensiones se hace necesario la implementación de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), para avanzar en la construcción de soluciones que permitieran el bienestar universal (Herrera Araújo et al., 2018).

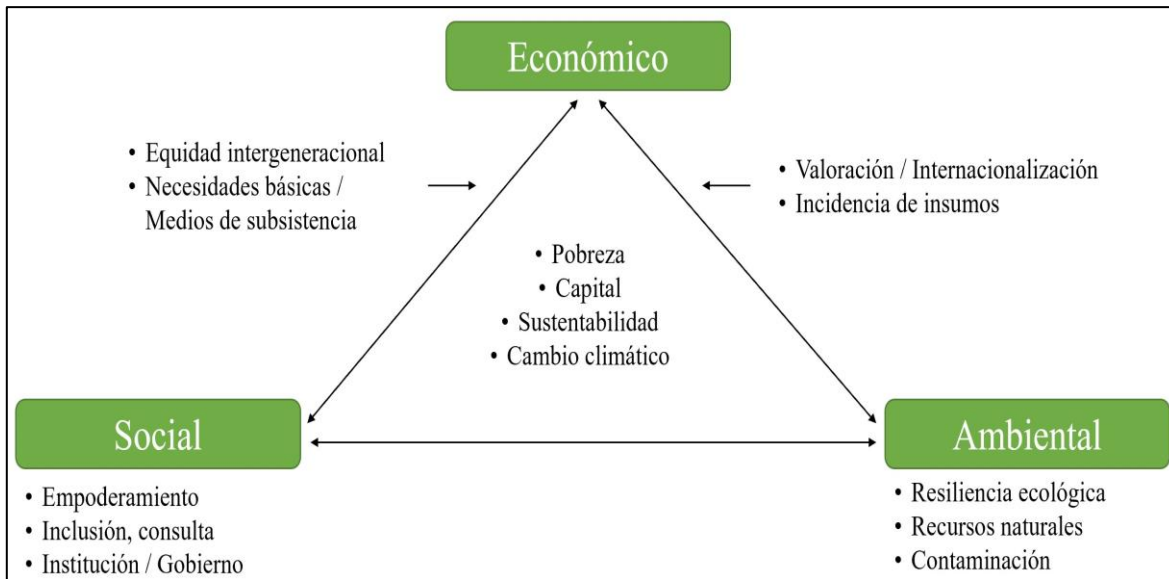
Figura 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: (Naciones Unidas, 2015)

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta el modelo económico y de consumo que plantea la economía de desarrollo lineal, se realiza un aporte importante de residuos de los diferentes sectores industriales que afectan el bienestar de las generaciones presentes y futuras, pérdida de recursos naturales y ecosistemas (Michelini et al., 2017). Desde esta postura, y bajo la mirada de (Prieto Sandoval et al., 2017), los *contextos* impactados desde la mirada de los ODS son los siguientes: la economía, la sociedad y el ambiente. Es importante destacar que, si bien el autor identifica estos 3 contextos, él expresa que estos encuentran interrelacionados, es decir que el componente económico se encuentra dentro de la sociedad y esta a su vez no puede ser posible sin lo ambiental, dando un lugar primordial a la conservación del ambiente en este enfoque. Es por ello, que al referirse a sostenibilidad en la construcción, se relaciona con la sostenibilidad de los asentamientos humanos y del medio ambiente (Acosta, 2009).

Figura 8. Enfoque de los Objetivos del Desarrollo Sostenible.



Fuente: (Munasinghe, 1993).

Según el Informe Brundtland, a través del componente económico, el desarrollo sostenible busca maximizar el uso eficiente de los flujos de recursos minerales, biológicos, energéticos, de información, la cantidad de bienes y servicios producidos. En el sistema social se garantiza la formación adecuada de todos los miembros de la sociedad en el proceso socioeconómico y la asignación equitativa de bienes y servicios entre los interlocutores sociales a nivel local, nacional o mundial y finalmente, en el componente ambiental se diseñan e implementan mecanismos de cumplimiento para la autorregulación y tiempos de ciclo natural de la biosfera (Duran et al., 2015).

### 3.2.9 Economía Circular y su impacto económico, social y ambiental

Antes de hacer una correlación entre la economía circular y sus efectos los contextos más impactados por los ODS (económico, social y ambiental), se considera pertinente introducir primero en el concepto de economía circular, el cual es utilizado por primera vez por David Pearce y R. Kerry Turner en su ensayo “Economía de los Recursos Naturales y del Medioambiente” publicado en el año 1995, en donde plantean que el flujo de recursos puede continuar si se busca la reutilización de lo que hasta ahora se había considerado

desecho en los diferentes sectores de la industria (Pearce & Turner, 1995). Este modelo económico está dirigido al uso eficiente de los recursos a través de la disminución de residuos, la retención de valor a largo plazo, la reducción de los recursos primarios y los lazos cerrados de productos, partes de productos y materiales dentro de los límites de protección ambiental y beneficios socioeconómicos (Morseletto, 2020).

Los recursos ya utilizados como motor para nuevas producciones rompen el esquema lineal de la economía para darle una forma circular. Este nuevo paradigma económico, responde al nuevo concepto de desarrollo sostenible, que para ese momento se había venido consolidando en las diferentes cumbres de naciones unidas (Prieto Sandoval et al., 2017). La economía circular incluye entonces un factor ambiental que contiene la economía y la sociedad como partes de este, y por tanto es necesario que funcionen para mantener el ambiente en un punto óptimo o tolerable.

A través de la aplicación de este ciclo económico, la extracción de materias primas se reduce, permitiendo la resiliencia ambiental y en consecuencia conservar la producción de recursos renovables y reutilizar materiales anteriormente considerados residuos. Para lograr esto, una de las estrategias más reconocidas actualmente es diseñar los productos de manera que puedan ser reutilizados o reciclados con la mayor facilidad posible, permitiendo a los productos tener una multiplicidad de vidas (Martín Carretero, 2019). McDonough y Braungart proponen tres principios fundamentales: lo que consideramos basura es materia prima para algo más, usar la energía renovable reduce la contaminación y celebrar la diversidad de actores implicados para lograr el cierre del ciclo (McDonough & Braungart, 2002).

### **3.3 Marco Normativo**

El marco legal del presente proyecto está conformado por los soportes normativos más relevantes que lo sustentan. En la Tabla 6 se relacionan de manera cronológica las normas legales sobre las cuales se basa este proyecto de grado. Es clave resaltar la Resolución 01115 de 2012, por medio de la cual el Distrito implementa un aplicativo web de seguimiento

y control, además, se establecen de forma detallada las responsabilidades y roles de los actores que hacen parte de la gestión integral de los RCD; hecho importante que marca un punto de referencia en el seguimiento y control de la gestión de dicho residuo. Por último, esta resolución es considerada base fundamental para la formulación e implementación de la Resolución 0472 de 2017 de orden nacional, en la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición.

Tabla 6. Marco legal aplicable al proyecto.

Norma	Jurisdicción	Emitida por	Asunto
Ley 99 de 1993. Art. 5 - No. 2, 10, 11 y 14	Nacional	Congreso de la República de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Es relevante en esta investigación, ya que a través de ella se atribuye a las autoridades municipales, distritales o metropolitanas la responsabilidad de efectuar el control sobre la disposición de residuos sólidos y de residuos tóxicos y peligrosos, dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales y adelantar proyectos de saneamiento y descontaminación. Este proyecto se enfoca puntualmente en generar aportes entorno a la mitigación de los daños ambientales por la inadecuada gestión de los RCD.
Decreto 357 de 1997	Distrital	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por el cual se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y materiales de construcción. Se considera importante la vinculación de este decreto a la investigación, ya que para establecer lineamientos y buenas prácticas en la gestión de

Norma	Jurisdicción	Emitida por	Asunto
			RCD, es necesario hacer un reconocimiento de las normas que cobijan dicho proceso, donde se involucra necesariamente el transporte y disposición final.
Acuerdo Distrital 417 de 2009	Distrital	Concejo de Bogotá	<p>Por medio del cual se reglamenta el comparendo ambiental en el Distrito Capital y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Se considera pertinente relacionar este acuerdo, ya que es importante hacer un reconocimiento de las sanciones a las que se exponen los generadores de RCD en caso de no cumplir con una adecuada gestión.</p>
Resolución 01115 de 2012	Distrital	Secretaría Distrital de Ambiente	<p>Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital.</p> <p>Se considera relevante para el proyecto, considerando que establece lineamientos y prácticas vinculadas a toda la cadena de gestión de los RCD, desde la generación, pasando por el transporte, y, finalmente, el tratamiento dado en los CTA y SDF, lineamientos cuyo reconocimiento es necesario para la definición de recomendaciones asociadas a la gestión de RCD, contextualizadas en la normativa nacional, pero enmarcadas en las necesidades locales.</p>

Norma	Jurisdicción	Emitida por	Asunto
Decreto 2981 de 2013	Nacional	Ministerio de vivienda, ciudad y territorio	<p>Es relevante para el presente estudio en la medida en que en su artículo 45 establece, respecto a la recolección de residuos de construcción y demolición, la responsabilidad del generador sobre el manejo y disposición de los residuos de construcción y demolición, quien tiene que sujetarse a las normas que regulen la materia.</p> <p>También determina que la coordinación del manejo de escombros le corresponde al Municipio con la entidad prestadora del servicio público de aseo. Este decreto reafirma 2 aspectos importantes, el primero al definir al generador como responsable de la gestión de residuos, y el segundo, aclarando que dicha gestión debe estar enmarcada dentro de la normatividad y que debe realizarse en coordinación con otros actores participantes en el proceso de gestión.</p>
Resolución 00932 de 2015	Distrital	Secretaría Distrital de Ambiente	<p>Por medio de la cual se modifica la Resolución 01115 del 26 de septiembre de 2012 y se adoptan los lineamientos técnico- ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el distrito capital.</p> <p>Esta resolución es parte importante de la investigación, ya que define puntualmente la obligatoria la formulación y ejecución de un Plan de Gestión de RCD para cada obra constructiva con áreas superiores a 5.000 m2 o que generen más de 1000 m3 de RCD. Este es un lineamiento normativo fundamental a nivel de gestión de RCD en proyectos de infraestructura.</p>



Norma	Jurisdicción	Emitida por	Asunto
Decreto 586 de 2015	Distrital	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C. Se considera pertinente relacionar este decreto, considerando que define la obligatoriedad de adoptar un modelo de gestión de RCD bajo un enfoque de sostenibilidad; en este sentido, todos los proyectos de infraestructura desarrollados en Bogotá deben tener en cuenta dicha disposición.
Resolución 472 de 2017	Nacional	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones. Es relevante para el presente estudio en la medida que se establecen las pautas para el manejo, control y reporte de los RCD en Colombia, considerándose como la ruta base para que generadores gestionen adecuadamente sus RCD.

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, n.d.) modificado por Autor, 2020.

### 3.4 Antecedentes

En China se realizó un estudio que proporciona una revisión de la literatura sobre los métodos de evaluación del desempeño para la gestión de residuos de construcción y demolición a partir de información obtenida de las bases de datos de Scopus, PubMed, Web of Science y Google Académico (Wu et al., 2019). De lo anterior, se evidenció que algunos estudios adoptan un sistema de pensamiento y un ciclo de vida para evaluar el rendimiento de la gestión de estos residuos, mientras que otras investigaciones adoptan un modelo basado en la sostenibilidad para finalizar la evaluación de su rendimiento y se demuestra que, en

comparación con los aspectos ambientales y económicos, el aspecto social genera menos atención.

Kabirifar et al., (2020) realizó una revisión sistemática de 97 artículos sobre factores que contribuyen en la gestión de los RCD junto con estrategias de reducción, reutilización y reciclaje. A partir de este estudio, se concluye que se deben incluir factores que contribuyan a la gestión eficaz de dichos residuos desde la perspectiva de la sostenibilidad, las actitudes de las partes interesadas, el ciclo de vida del proyecto y las herramientas de gestión para luego incorporarse con la estrategia de las 3R (Reducir, Reutilizar, Reciclar).

Además, en España identificaron factores que influyen en la adopción de la economía circular sobre las cinco etapas (preconstrucción, construcción y renovación, recolección y distribución, fin de vida útil y recuperación y producción de materiales) del ciclo de vida de las actividades de construcción y demolición a través de una revisión sistemática de 267 documentos (López Ruiz et al., 2020). Esto con el fin de identificar estrategias para implementar de manera práctica en toda la cadena de valor de los RCD, tales como: diseño para la prevención de residuos, diseño para el desmontaje, uso de elementos prefabricados, instrumentos económicos, planes de manejo, planes de gestión de residuos del sitio, técnicas de recogida y segregación, transporte, deconstrucción selectiva, auditorías previas a la construcción y demolición, reutilizar, reciclaje, recuperación de energía y relleno.

La dinámica de sistemas es una herramienta utilizada por las partes interesadas en la planificación de políticas para tomar mejores decisiones sobre cómo gestionar los residuos de construcción y demolición (Shiboub & Assaf, 2019). Por ejemplo, Hao et al., (2007) desarrolló un modelo de simulación basado en la dinámica de sistemas para la planificación estratégica de los residuos de construcción y demolición en Hong Kong al incorporar la relación de las principales actividades inherentes a la gestión de estos residuos. Este modelo de simulación ayuda a los responsables de la toma de decisiones a comprender mejor la complejidad de la información y los procesos involucrados en la gestión de los RCD durante el ciclo de vida de un proyecto. Más tarde, este enfoque fue adoptado por Wang & Yuan,

(2009) para construir un modelo que simula el sistema de gestión de estos residuos en China sugiriendo su gran potencial para aplicarse por su complejidad (interrelaciones y dinámica).

En el caso de Latinoamérica, se considera pertinente vincular la investigación titulada “Memoria e Identidad Local después de un Terremoto: Reciclaje de Escombros Simbólicos y su Uso” la cual buscó, fundamentalmente, fomentar la conciencia respecto al reuso del patrimonio destruido (escombros con algún tipo de simbología) destacando su potencial empleo para el acondicionamiento de espacios públicos con un carácter memorial (Basoalto, Cerda, Mora, Pérez, & Riviera, 2010), basándose en la identidad sísmica que la historia del país ha construido. Dentro de la propuesta, los autores promueven el desarrollo de iniciativas de reuso de RCD simbólicos, con el propósito de generar un impacto ambiental positivo, motivando la economía circular desde aspectos con valor emocional para las comunidades.

Otra investigación enmarcada en la economía circular es la titulada “Urbanización de viviendas y gestión ecoeficiente de residuos de construcción en Chile: aplicación del modelo español”, llevada a cabo por los autores Muñoz, Rivero, Marrero, & Cereceda (2019), y buscó básicamente presentar el caso de la construcción de un total de 17 casas unifamiliares, basándose en una metodología sustentada en un modelo de gestión de RCD desarrollado en España. Como resultado de la investigación se pudo observar que se lograron disminuir los costos de construcción en un 50%, exaltando entonces no solo el impacto ambiental logrado sino también el beneficio económico. De acuerdo con el resultado obtenido, los autores infirieron que la apropiación de la metodología Española al contexto chileno es viable.

Para el caso de Colombia, Tascón (2017) realizó un modelo dinámico para contrastar estrategias de gestión de Residuos de Construcción y Demolición articulando cuatro módulos interrelacionados entre sí, esto es un módulo de generación y gestión de RCD, que presenta un alcance que va desde su generación hasta su tratamiento para ser reincorporado dentro de la cadena de abastecimiento o hacia su disposición final; dos módulos para la integración de estrategias uno con énfasis en características logísticas de la operación y el otro de carácter regulatorio, por último un módulo que integra el sistema de indicadores sobre el cual se contrastaría el desempeño de las estrategias evaluadas (Tascón Hoyos, 2017). En el anterior

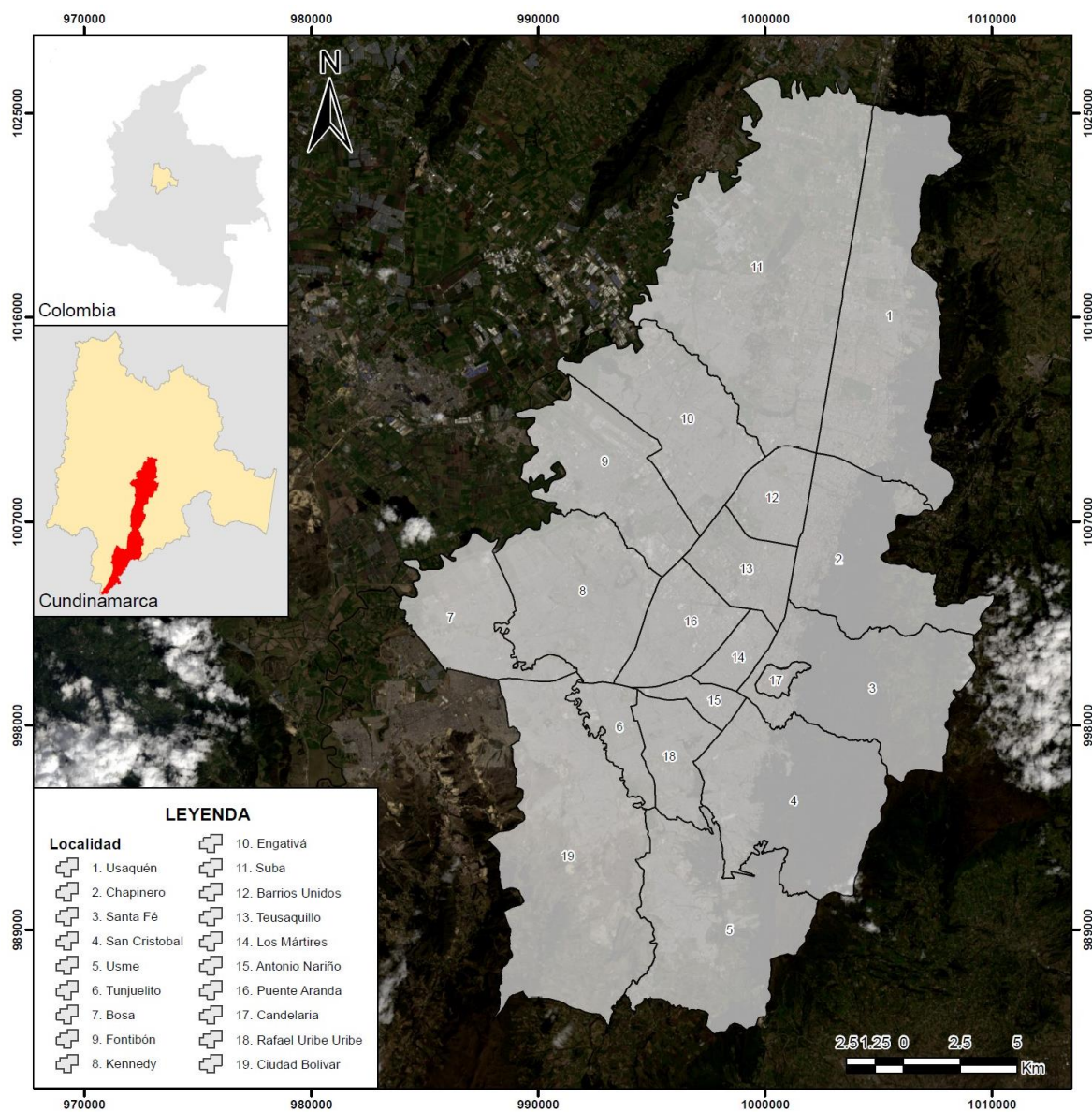
estudio se concluye que es posible definir un sistema de indicadores para la dimensión ambiental, económica y social debido a que el impacto de dichos residuos incide en estas dimensiones y, por otro lado, estos indicadores pueden rediseñarse acorde con las prioridades de los sistemas.

#### **4 ÁREA DE ESTUDIO**

El proyecto se desarrolla en la ciudad de Bogotá, ubicada sobre la Cordillera Oriental del sistema montañoso de Los Andes, al interior del departamento de Cundinamarca (figura 9) en las siguientes coordenadas geográficas: 4°35'56"N y -74°04'51"W a una altura promedio de 2.550 metros sobre el nivel del mar. La capital de Colombia tiene una extensión de 163.635 hectáreas de territorio de los cuales 37.972 hectáreas son de suelo urbano (23,2 %), 122.687 hectáreas son de suelo rural (75 %) y 2.974 hectáreas corresponden a suelo de expansión (1,8 %). Además, tiene una temperatura promedio de 14 °C, que puede oscilar entre los 9 °C y los 22 °C (Medina, 2019) y cuenta aproximadamente con un número de 7.181.469 millones de habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, 2019).

Limita por el norte con el municipio de Chía; por el oriente con los municipios de La Calera, Choachí, Ubaque, Chipaque, Une y Gutiérrez y los municipios Guamal y Cubarral (Meta); por el sur con el municipio Uribe (Meta) y el municipio Colombia (Huila); y por el occidente con los municipios de Cota, Funza, Mosquera, Soacha, Pasca, Arbeláez, San Bernardo y Cabrera (Cundinamarca) (Medina, 2019).

Figura 9. Localización del área de estudio.



Fuente: Autor, 2020.

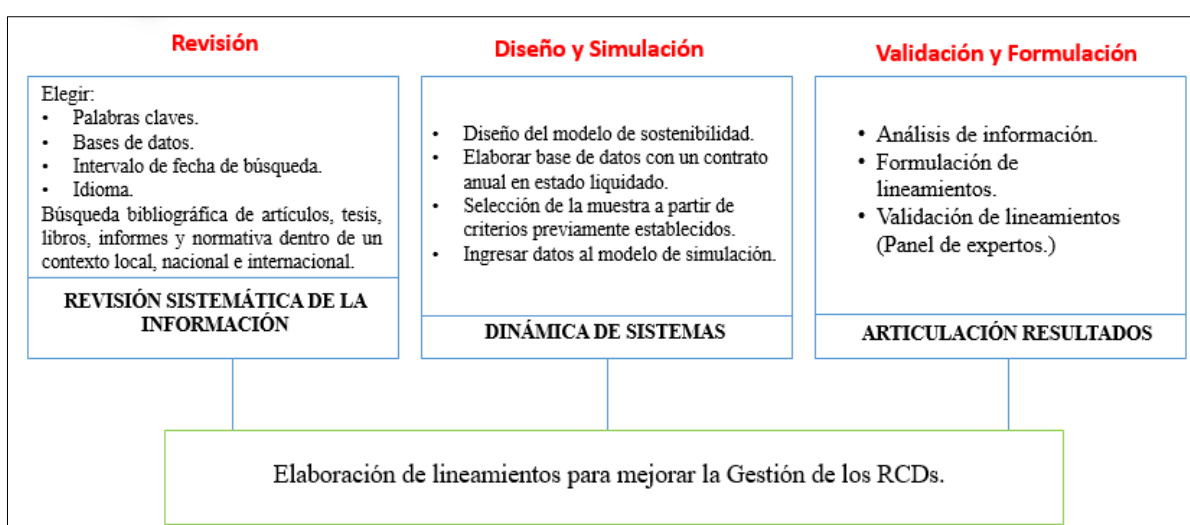
## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta la metodología y materiales que se utilizarán en la presente investigación de acuerdo con el método de dinámica de sistemas, para el diseño del

modelo de simulación y revisión sistemática sobre la gestión de los RCD a nivel local, nacional e internacional con un enfoque a obras de infraestructura vial.

Con el propósito de presentar la metodología a seguir, discriminada en cada uno de los objetivos específicos, se presenta en la figura 10 las diferentes actividades, que se van a realizar a través del proyecto para la elaboración de lineamientos de mejora para la gestión de los RCD, teniendo en cuenta las siguientes fases: revisión, diagnóstico y formulación.

Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología a desarrollar en el trabajo de grado.



Fuente: Autor, 2020.

## 5.1 Diseño del estudio

Para el diseño del modelo de simulación sostenible es necesario recolectar información sobre los aspectos económicos, ambientales y sociales, dentro de la ciudad de Bogotá el Instituto de Desarrollo Urbano genera una importante cantidad de contratos de infraestructura vial que, por ejemplo, en la planeación realizada a finales 2020 se proyectaba una inversión en obras que ascendía al orden de los 10 billones de pesos (IDU, 2020), considerándose entonces una relación directa con la gran generación de RCD en Bogotá, es por ello que se consideró representativo tomar como casos de estudio 2 contratos de proyectos realizados por el IDU. La selección de los casos de estudio obedece a un muestreo

por conveniencia, teniendo en cuenta que “es una técnica de muestreo no probabilístico y no aleatorio utilizada para crear muestras de acuerdo con la facilidad de acceso a los datos” (Peña, 2006). La selección de dichos contratos se realiza a partir de los siguientes parámetros: Listar los contratos ejecutados desde el año 2013 a 2019 en el IDU, se categorizaran por proyectos desarrollados por las áreas ejecutoras de contratos de obra del IDU, posteriormente filtrar los contratos que estén en estado de liquidación con el propósito de obtener el panorama general ocurrido en la obra y poder contar con la mayor información posible, así mismo, los datos son definitivos y no son sujetos de modificación en un futuro, posteriormente se seleccionan las obras con mayor volumen de generación de RCD, mayor costo de ejecución y finalmente con acceso a información completa. Los criterios de selección de los proyectos que son tomados como caso de estudio, se han establecido buscando obtener resultados robustos, que permitan dar validez al comportamiento real de los proyectos de infraestructura que se desarrollan en Bogotá.

## **5.2 Población y muestra**

La población de estudio son todos aquellos proyectos de infraestructura que se categoricen como “grandes generadores” de RCD, y que se lleven a cabo en la ciudad de Bogotá. A pesar de que el modelo diseñado, lineamientos y recomendaciones son aplicables a cualquier proyecto de infraestructura vial desarrollado en Bogotá, se tomarán como muestra y casos de estudio 2 proyectos de infraestructura desarrollados por el IDU, seleccionando dicha muestra a conveniencia, dado que pueden representar una típica obra de infraestructura vial desarrollada en el Distrito.

## **5.3 Métodos de Recolección y Análisis de Datos**

El tipo de investigación es de carácter descriptivo y cuantitativo. Se realiza una revisión sistemática siguiendo los criterios de Harari et al., (2020), con esta técnica se identifican los lineamientos y estrategias que han permitido la apropiada gestión de los RCD a nivel nacional e internacional. Posteriormente, se analiza la dinámica de los RCD siguiendo los lineamientos de la dinámica de sistemas que permiten la simulación y modelación de escenarios (Forrester, 1969). Analizar los procesos y obras seleccionados de áreas ejecutoras

de contratos de obra del IDU y sus interacciones en la producción de RCD para formular lineamientos que permitan mejorar la gestión de dichos residuos.

Las revisiones sistemáticas son usualmente utilizadas como puntos de partida para el desarrollo de diferentes investigaciones, ya que proveen la mejor evidencia sobre un tema en específico. Según Harari et al., (2020) las revisiones sistemáticas de la literatura ya sean cuantitativas o cualitativas, son herramientas importantes para lograr conclusiones de grandes cuerpos de investigación, permitiendo el avance de la teoría científica y práctica basada en la evidencia.

La dinámica de sistemas permite identificar el problema, desarrollar una hipótesis, construir, verificar y probar un modelo de simulación. Forrester, (1969) presentó un modelo de crecimiento de población que describe las principales relaciones de la población y su incidencia en el crecimiento de vivienda e industrias en zonas urbanas, simulando el ciclo de vida y prediciendo los impactos generados en la ciudad.

Esta investigación está dirigida a todos los actores que intervienen actualmente en la gestión de los RCD en Bogotá D.C., tales como la academia, los transportadores de RCD, representantes del sector productivo de materiales de tipo reciclado, como son las empresas de tratamiento y aprovechamiento de los RCD y grandes generadores como los constructores, así como los sitios de disposición final, por otra parte, la autoridad ambiental que formula la política pública y ejerce el seguimiento y control a este tipo de residuo en el caso de Bogotá se encuentra la Secretaría Distrital de Ambiente y frente a un futuro deseable ampliar a institutos como el SENA que permita la formación a los equipos de trabajo, incluyendo la mano de obra no calificada, entidades como el IDIGER, la vinculación de la agremiación de constructores de orden privado como CAMACOL. El desarrollo de la presente investigación se llevará a cabo mediante las siguientes etapas.



### 5.3.1 Revisión Sistemática de Información

En la revisión sistemática se realiza una revisión de aspectos cuantitativos y cualitativos de estudios primarios, con el objetivo de resumir la información existente respecto a un tema en particular (Manterola et al., 2013). Además, Harari et al., (2020) afirma que para revisar un cuerpo de literatura, primero se deben identificar los estudios relevantes para su inclusión utilizando una estrategia sistemática y reproducible.

Es así como se aplica la estrategia de búsqueda más utilizada, que consiste en elegir las palabras claves que tienen relevancia sobre el tema de investigación, con el fin de realizar una búsqueda en una o más bases de datos. Debido a que la selección de dichas palabras claves y bases de datos tienen implicaciones significativas en la búsqueda de información, las mejores prácticas sugieren que los revisores utilicen la revisión por pares para tomar estas decisiones, con mayor frecuencia a través de consultas con un bibliotecario (Koffel, 2015).

Aunque las búsquedas en la base de datos tienden a ser el método de identificación de estudio más utilizado, existen estrategias complementarias que pueden incorporarse para ayudar a garantizar la cobertura integral de una literatura de investigación. Los métodos de identificación de estudios utilizadas con mayor frecuencia son: búsqueda en base de datos, búsqueda en manuales, programas de conferencia, correspondencia personal, anuncios, sitios web y archivos de bases de datos en línea (Harari et al., 2020).

Además, los parámetros de búsqueda a considerar y reportar son: las bases de datos específicas buscadas, los intervalos de fechas para la revisión, los términos de búsqueda específicos utilizados, las frases booleanas utilizadas en la búsqueda, cuáles fueron los criterios de exclusión del idioma y regiones geográficas consideradas (Moher et al., 2009). Para la presente investigación se buscan datos relevantes sobre procesos y estrategias para la gestión de los RCD, que cumplan los criterios de selección anteriormente mencionados, obtenidas de fuentes de información primaria y secundaria.

La investigación inicia con la revisión documental sobre la gestión integral de los RCD desde 2013 a 2020. Las cadenas de búsqueda seleccionadas se fundamentan en: WEB OF SCIENCE, BIBLOS JAVERIANA – BUSCADOR INTEGRADO, sCielo, Google Académico. La fórmula de cadena búsqueda es la siguiente:

("residuo\* de construccion\*" OR "residuo\* de demolicion\*" OR escombros\*) AND  
(gestión OR manejo OR práctica\* OR administración)

(TITLE-ABS-KEY ("Construction demolition waste" OR "Construction waste" OR "demolition waste" OR "Construction debris") AND TITLE-ABS-KEY (management OR treatment OR plan\* OR best AND practice\*))

Se define una serie de criterios con el fin de determinar que documentos se deben incluir o excluir de la revisión, por lo que se ha generado la siguiente categorización: A. Tipo de residuos. B. Información repetitiva. C. Revisión del título y resumen. D. Número de citas. A partir del conjunto de documentos seleccionados que describen procesos y estrategias en la gestión de los RCD, se construye una base de datos con la siguiente estructura que se presenta en la

Tabla 7.

Tabla 7. Formato base de datos.

Cuartil	Referencia APA	Autor	País	Título	Resumen	Factor determinante	Conclusiones	Observaciones	Brechas	Aportes
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autor, 2020.

Por otra parte, es necesario la revisión de informes técnicos con el fin de obtener una mayor profundidad de búsqueda, los cuales son estudios no indexados que no están disponibles a través de las suscripciones de la biblioteca y requieren correspondencia personal con los autores u otros medios para obtenerlos, por lo cual son más difíciles de descubrir y acceder que los estudios indexados (Harari et al., 2020). Se realiza la búsqueda

de publicaciones por parte de las Autoridades Ambientales Competentes tales como la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA), UAESP y CAR. Además, se lleva a cabo una revisión de la normatividad ambiental aplicable y vigente sobre los RCD en el contexto nacional e internacional.

Por último, a través de la interpretación de la información analizada, se indica cuáles de las acciones generadas en otros países se pueden adoptar y optimizar, cómo podemos responder de mejor manera a la gestión de este tipo de residuo y teniendo en cuenta las experiencias encontradas, definir cuáles son los vacíos que se deben resolver para potencializar el uso de estos materiales.

### **5.3.2 Modelo de Sostenibilidad**

El modelo utiliza las técnicas propuestas desde la dinámica de sistemas, la cual permite comprender la interrelación entre los diferentes aspectos económicos, ambientales y sociales (Pérez et al., 2006). A través de la dinámica de sistemas, se logró comprobar que reciclar residuos de construcción y demolición conduce a reducciones significativas en las emisiones, el uso de energía, el potencial de calentamiento global y conserva el espacio de los vertederos, aunque, el costo de mitigar el impacto de su eliminación es extremadamente alto (Marzouk & Azab, 2014).

Según la Sociedad de Dinámica de Sistemas (System Dynamics Society, 2020) los softwar más empleados para el modelado y simulación en dinámica de sistemas son STELLA, iThink, Powersim Studio y Vensim. El software STELLA está destinado a los ámbitos educativo y científico, mientras que iThink pretende servir de herramienta empresarial debido a sus aplicaciones en economía, sin embargo, al igual que STELLA no se pueden dibujar diagramas causales y su versión gratuita no permite guardar los modelos de simulación obligando a comprar el software (Lorenzo Espejo, 2018).

Por otra parte, Powersim Studio es un software noruego que se usa principalmente para modelos de gestión de la producción en grandes empresas, mientras que Vensim, es un software destinado a mejorar el rendimiento de sistemas en diferentes ámbitos desde ciencias medioambientales y sanitarias hasta gestión de proyectos y logística (Lorenzo Espejo, 2018). Mediante el uso del software de simulación Vensim PLE se realiza el modelo de sostenibilidad, ya que este, es una herramienta dinámica que en su versión gratuita permite modelar y optimizar en condiciones determinantes e inciertas (Abbaspour et al., 2018). Su interfaz gráfica y símbolos permiten la vinculación de variables (Tabla 8) relacionadas a la gestión de los RCD.

Tabla 8. Variables de nivel del modelo de simulación.

Subsistema	Variable	Unidad de Medida	Fuente
Económico	Costos (Asociados a transporte y disposición final de RCD en el proyecto)	\$	IDU
Social	Empleos Verdes	No. de empleos verdes generados / Año	IDU
Ambiental	RCD Reciclado	m <sup>3</sup> de RCD / Año	IDU
	RCD Reutilizado	m <sup>3</sup> de RCD / Año	IDU
	RCD Dispuesto	m <sup>3</sup> de RCD / Año	IDU
	Material Recurso Natural	m <sup>3</sup> de RCD / Año	IDU

Fuente: Autor, 2020.

El principal objetivo del modelo de simulación es la construcción de posibles escenarios para el año 2030. A través de estos, se formulan lineamientos que permitan mejorar la gestión de los residuos de construcción y demolición en el desarrollo de obras de infraestructura vial. Para obtener los datos de insumo de las variables del subsistema económico, ambiental y social se hace necesario realizar los siguientes pasos:

- a. Elaborar una base de datos de los contratos desarrollados en las áreas ejecutoras de contratos de obra del IDU, entre los años 2013 a 2019, con la siguiente información: número de contrato, empresa contratista, objeto contractual (tipo de intervención), valor pagado, estado (ejecución o liquidación) y generación total de RCD (Volumen).
- b. Seleccionar la muestra a través de los siguientes parámetros: categorizar por proyectos desarrollados por las áreas ejecutoras de contratos de obra del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), posteriormente filtrar los contratos que estén en estado de liquidación, con mayor volumen de generación de RCD, mayor costo de ejecución y finalmente con acceso a información completa.
- c. Obtener la siguiente información de cada contrato para alimentar las variables del subsistema económico y ambiental: Volumen generado, volumen dispuesto (centro de tratamiento y aprovechamiento y/o disposición final autorizado), volumen reutilizado, volumen de material de recurso natural y costo de gestión total de los RCD.
- d. Obtener información del número de transportadores de RCD, inspectores SISOMAS, residentes ambientales y brigadistas de orden, aseo y limpieza (BOAL) de los contratos previamente seleccionados como datos de insumo de la variable Empleos Verdes del subsistema social. Entendido “Empleos Verdes” como la empleabilidad requerida en la gestión de los RCD (González Angarita, 2018).

### **5.3.3 Validación del Modelo de Simulación y Lineamientos**

Para la validación de los lineamientos se crea un grupo focal el cual suele estar compuesto por un pequeño número de personas, en donde se recopilan datos que sean de interés para el investigador y brinda recomendaciones o toma de decisiones entre las alternativas propuestas (Krueger & Casey, 2014). El grupo está conformado por ocho personas que representan los siguientes actores: la academia, la autoridad que formula la política pública y ejerce el seguimiento y control a este tipo de residuo, representantes del sector productivo de materiales de tipo reciclado y grandes generadores.

El grupo de expertos discutirá la validez de las variables que componen el modelo de simulación sostenible y los lineamientos propuestos en la investigación sobre la mejora de la gestión de los RCD a través de la plataforma Microsoft Teams, quienes desde su experticia, necesidades y rol desempeñado en esta materia evalúen la pertinencia, novedad y viabilidad de los resultados.

## **6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Como etapa final se procede a identificar documentos relacionados con la gestión de RCD con el fin de seleccionar los documentos que cumplan con los criterios del capítulo 5 (numeral 5.1, pág. 56) y así poder conocer las estrategias y factores determinantes que en el contexto nacional e internacional han permitido un avance en la gestión de los RCD. Luego se realiza la simulación de dos escenarios para cada contrato seleccionado con el propósito de observar el comportamiento de las variables de nivel “Material Reciclado”, “RCD Reutilizado”, “RCD Dispuesto”, “Empleos Verdes”, “Costos” y “Material Recurso Natural”.

### **6.1 Revisión Sistemática**

A continuación, se presentan los resultados de la revisión sistemática de información, a partir de la cual fue posible identificar procedimientos y/o estrategias de gestión de RCD

llevadas a cabo en el marco nacional e internacional, las cuales fueron analizadas para determinar su aplicabilidad en Bogotá. Considerando que Holanda es el país más destacado en Europa a nivel de gestión de RCD, ya que logra reutilizar o reciclar el 90% de dichos tipos de residuos, se hace especial énfasis en las estrategias que este país ha llevado a cabo para lograr el mencionado nivel de aprovechamiento.

Tabla 9. Estrategias de gestión de RCD

Estrategia/ procedimiento	País/Ciudad	Descripción	Análisis de aplicabilidad en Bogotá
Penalización por vertimiento	Holanda Dinamarca Suecia Finlandia Bélgica Austria Italia Francia	En Holanda el vertimiento maneja la tasa de penalización más elevada en Europa desde el año 95; esto presiona a los generadores a buscar el máximo aprovechamiento a fin de evitar sanciones económicas (Horrach, 2017).	La penalización bajo el modelo Holandés es una estrategia viable en Bogotá, sin embargo, es importante destacar que no se pueden introducir tasas de penalización elevadas de manera repentina, se considera que se puede introducir penalidades moderadas, que pueden ir incrementando en la medida en que el sector fortalezca sus capacidades de aprovechamiento, y se acondicione el contexto para tales fines; pues como bien se sabe, la gestión de los RCD no interviene solo el generador, sino también los transportadores, centros de tratamiento y aprovechamiento, entre otros que deben prepararse para un incremento significativo en la reutilización y el reciclaje.
Concesión de subsidios	Holanda	Otra estrategia que aplica Holanda es la concesión de subsidios a los contratistas de proyectos de infraestructura, a los cuales les otorgan, bonos y reducción de tasas como principales incentivos por la	Se considera que para el caso de Bogotá es viable la aplicación de este tipo de subsidios a los contratistas, para ello no hace falta más que voluntad política y gestión por parte de las



<b>Estrategia/ procedimiento</b>	<b>País/Ciudad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Análisis de aplicabilidad en Bogotá</b>
		utilización de materiales reciclados (Ying, 2011).	autoridades ambientales, para estimular el uso de materiales reciclables en Bogotá.
Penalización por el uso de materiales naturales	Dinamarca Gran Bretaña	La iniciativa consiste en definir planes de impuestos al uso de materias primas naturales, buscando que el costo de uso de dichos recursos sea superior al del reúso o el reciclaje, estimulando el aprovechamiento (Ying, 2011).	Es posible implementar este tipo de estrategias en Bogotá, ya que el uso de los materiales reutilizados y reciclados disminuiría costos al evitar el impuesto por uso de materiales naturales. Si bien se observa la estrategia como viable, tal y como ocurre con la penalización por disposición final, es necesario garantizar que el contexto se acondicione para el incremento del aprovechamiento, garantizando que exista, suficientes lugares para el transporte, clasificación, transformación, entre otros.
Política de separación en la fuente	Bélgica Alemania España	Estos países han desarrollado políticas a partir de las cuales se obliga a realizar separación en la fuente, y, además, se definen protocolos específicos de aprovechamiento para los proyectos de infraestructura, lo cual ha permitido disminuir significativamente los volúmenes residuos para disposición	Si bien Bogotá obliga a realizar separación en la fuente, de acuerdo con la resolución 1115 artículo 11 (del procedimiento y las medidas preventivas y sancionatorias), no se realiza un seguimiento efectivo al cumplimiento por parte del ente de control, razón por la cual se recomendaría fortalecer el esquema de control y vigilancia.

Estrategia/ procedimiento	País/Ciudad	Descripción	Análisis de aplicabilidad en Bogotá
		final. (Pacheco, Fuentes, Sánchez, & Rondón, 2017)	
Políticas sobre vertimiento e incineración	Dinamarca	Esta política prohíbe la disposición final (vertido o incineración) de RCD que puedan ser recuperados mediante un sistema ambientalmente seguro. (Durán & Garzón, 2016).	Se considera que Bogotá aún no se encuentra preparada para el establecimiento de normas tan rígidas, dado que, como ya se ha mencionado en ocasiones anteriores, los actores partícipes de la gestión de RCD aún no se encuentran preparados para un incremento repentino del aprovechamiento.
Estrategia del ciclo cerrado para la Gestión de RCD	Alemania	Esta estrategia busca prevenir y recuperar; para ello, se establecen lineamientos para que los insumos de construcción se produzcan bajo un enfoque de ampliación de su vida útil, y también propone procedimientos que buscan generar la cantidad mínima de residuos. (Durán & Garzón, 2016).	Se considera viable para Bogotá la definición de procedimientos para la generación mínima de residuos; así mismo; es necesaria la realización de estudios y el desarrollo estrategias para que los proveedores del sector se motiven a crear y ofrecer productos con mayor vida útil. Es claro que lograr este propósito no es sencillo, pero es posible empezar a explorar este tipo de alternativas.
Diseño de planes de gestión de RCD	España	A raíz de un incremento significativo en la generación de RCD derivado de un crecimiento de la industria constructora,	Se considera que esta es una de las alternativas con mayor viabilidad para su implementación en Bogotá, ya que un plan permite

<b>Estrategia/ procedimiento</b>	<b>País/Ciudad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Análisis de aplicabilidad en Bogotá</b>
		<p>España definió un Plan Nacional de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición, en el cual se definieron unos objetivos claros a nivel de gestión de RCD, y se establecieron una serie de líneas de acción para su cumplimiento, tales como la sensibilización, el fortalecimiento de la inspección, control y vigilancia de la gestión de RCD, el aumento en el acompañamiento y asesoría por parte del estado, la armonización para la cooperación, entre otros aspectos que se consideraron fundamentales para responder a las necesidades de sostenibilidad desde la economía circular (Secretaría de Estado de Medio Ambiente, 2008).</p>	<p>realizar un acondicionamiento para que la gestión de RCD se pueda dar bajo las condiciones de un contexto particular, de modo que esto incluiría apoyos del gobierno en términos de asesoría, la inversión en infraestructura para el aprovechamiento, sensibilización, capacitación y muchos otros aspectos que permitirían trabajar desde varios frentes en simultáneo para cumplir con objetivos claros de sostenibilidad.</p> <p>Si bien ya se han observado esfuerzos por parte de algunas entidades, como la Unidad de Mantenimiento Vial que diseñó su Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición, a través del cual se definieron acciones que potencializan la reutilización, el reciclaje y la valorización de los RCD'S en las intervenciones de Rehabilitación a cargo de la entidad en Bogotá (UMV, 2010), se consideraría pertinente un plan con alcance a cualquier obra de infraestructura desarrollada en la ciudad.</p>

Estrategia/ procedimiento	País/Ciudad	Descripción	Análisis de aplicabilidad en Bogotá
Programas promotores de la gestión RCD - Internacional	Estados Unidos	Este país cuenta con programas que certifican aquellas construcciones que cumplen con determinados estándares de sostenibilidad. Normalmente, esto aporta positivamente a la imagen de los constructores, quienes pueden verse motivados en la maximización del aprovechamiento de RCD (Durán & Garzón, 2016).	Hoy en día, muchas empresas buscan favorecer su imagen a través de elementos que tienden a ser de interés general como la preocupación en torno a los impactos negativos al ambiente, una certificación ambiental que le permita a las empresas contratistas del sector de la construcción, mostrarse como “amigables con el ambiente” podría diferenciarlas y motivarlas a hacer una mejor gestión de sus residuos. Se considera entonces que este tipo de estrategias son viables para Bogotá, máxime si se considera que podrían tener un impacto significativo sin mayor inversión.
Fortalecimiento de la infraestructura	Brasil Holanda	El fortalecimiento de la infraestructura es uno de los mecanismos que se constituye como uno de los principales factores de éxito en otros países; tal y como se mencionaba para el caso de Holanda, la creación de centros de transformación de grandes capacidades es fundamental al proyectar un incremento en el aprovechamiento. En Brasil se instaló	No se puede pensar en el incremento del aprovechamiento sin ir de la mano con fortalecimiento de la infraestructura necesaria; esto, más que una alternativa estratégica se convierte en una necesidad, ya que de nada serviría promover la gestión de RCD a través de normas, sensibilización, certificaciones u otros mecanismos, si el contexto no está preparado para el incremento del aprovechamiento. Se considera entonces un

Estrategia/ procedimiento	País/Ciudad	Descripción	Análisis de aplicabilidad en Bogotá
		<p>una planta dedicada al reciclaje dedicada estrictamente a RCD de proyectos de infraestructura vial. (Durán &amp; Garzón, 2016).</p>	<p>elemento fundamental, pero su viabilidad depende de la voluntad política.</p>
<p>Programas promotores de la gestión RCD-Nacional</p>	<p>Medellín Cali Barranquilla Ibagué Villavicencio</p>	<p>En estas ciudades se ha experimentado un incremento en los esfuerzos asociados a la gestión adecuada de los RCD a través de definición normativa y estructuración de programas. (Suarez, Betancourt, Molina, &amp; Mahecha, 2019)</p>	<p>Es importante destacar que, si bien algunas ciudades principales que son grandes generadoras de RCD están incrementando sus esfuerzos de orden estratégico, es importante tener claro que la principal generadora es Bogotá, en esta medida, es la ciudad que más acciones ha realizado en el país para mejorar su gestión de RCD, de modo que, se puede considerar que las demás ciudades no se constituirían como modelos de gestión de RCD, sino que, al contrario, las demás ciudades procuran seguir de algún modo los pasos y avance que ha alcanzado Bogotá hasta el momento, por cuanto se concluye que es pertinente tomar modelos internacionales más consolidados y con experiencias de éxito comprobadas.</p>

Se observa que se han logrado diferentes avances, en especial en el marco internacional sobre el manejo de estos residuos con un enfoque en economía circular y desarrollo sostenible, sin embargo, se encuentra que existe una gran brecha entre Colombia y algunos países europeos que alcanzan un aprovechamiento de hasta el 90% en el sector constructor. Esta brecha puede crecer en Colombia a raíz de diferentes situaciones, entre las cuales puede estar el desconocimiento de los beneficios económicos que puede traer la economía circular, la falta de sensibilización ambiental, normativa ambiental excesivamente flexible, e incluso el hecho que al transformar este tipo de material, no siempre cumple con las especificaciones técnicas para poder reemplazar en mayor medida los materiales de tipo natural, entre otros. Finalmente, se habla que el sector construcción debe alcanzar lo que se define como economía circular y desarrollo sostenible, sin embargo, no se ha determinado una ruta de acción para su desarrollo e implementación.

## **6.2 Modelo de Simulación**

El modelo de simulación sostenible propuesto se fundamenta en tres (3) subsistemas (económico, social y ambiental) compuestos por seis (6) indicadores, cada uno con su unidad de medida y fuente de información (Tabla 8). Los datos insumo del modelo se obtienen a partir de dos (2) contratos previamente seleccionados conforme a los parámetros mencionados (Tabla 10). El primer contrato identificado con el código IDU1385 del 2017 pertenece a la Dirección Técnica de Mantenimiento (DTM) y el segundo contrato identificado con el código IDU1300 del 2015 pertenece a la Dirección Técnica de Construcciones (DTC). Para el caso del contrato No. IDU 1385 de 2017 el periodo de simulación es desde el año 2018 hasta 2025 y para el contrato No. IDU 1300 de 2015 desde el año 2016 hasta 2030.

Tabla 10. Contratos Modelo de Simulación Sostenible

Contrato No.	Objeto	Área	Periodo de ejecución	Volumen de RCD generado (m <sup>3</sup> )	Costo de inversión total (COP)
IDU1385 del 2017	Ejecutar a precios unitarios y a monto agotable, las actividades necesarias para la ejecución de obras de conservación de la malla vial arterial no troncal, en la ciudad de Bogotá D.C. grupo 1. (zona oriental)	Dirección Técnica de Mantenimiento (DTM)	20 de Diciembre de 2017 a 19 de Enero de 2020	108.582,95	\$51.786.248.809
IDU1300 del 2015	Estudios, diseños y construcción de la avenida San Antonio (Ac 183) desde la avenida Paseo los Libertadores (Autopista Norte) hasta avenida Alberto Lleras Camargo (Ak 7) antes Acuerdo 180 de 2005, modificado por Acuerdo 527 de 2013, en Bogotá D.C.	Dirección Técnica de Construcciones (DTC)	08 Enero 2015 a 27 de Junio 2018	103.296,56	\$56.213.300.311

Fuente: Autor, 2020.

El modelo de simulación permite formular políticas públicas, estrategias y toma de decisiones para la futura gestión de los RCD no solo a nivel local, regional y nacional sino también internacional. Asimismo, el modelo propuesto es una herramienta innovadora que permite a las autoridades competentes planificar y simular las políticas ambientales aplicables que interactúan con diferentes subsistemas (socioeconómico, ambiental y urbano).

Dado que el modelo de simulación sostenible se alimenta de una base de datos para sus proyecciones, estos deben ingresarse mensualmente hasta abarcar el total de la ejecución del contrato para lograr mayor asertividad en la proyección del comportamiento de las variables de sostenibilidad. El modelo de simulación se construye a través del uso del software Vensim PLE Plus el cual nos permite interactuar con diferentes variables

relacionadas a la gestión de los RCD (Figura 11). El principal objetivo del modelo de simulación es construir dos escenarios para el año 2030 para cada contrato.

En el primer escenario se da a conocer la situación de la gestión integral de RCD según la política actual (Resolución 01115 del 2012) para ambos contratos, el cual se compara con el segundo escenario en donde se busca responder a la pregunta: ¿Cuál es el comportamiento de las variables de los subsistemas social, económico y ambiental al aumentar el porcentaje de aprovechamiento de un 25% establecido en la resolución 1115 del 2012 a un 50%? Además, es necesario analizar los diferentes valores que pueden adoptar las variables (tasa de cambio) “Empleos Verdes”, “RCD Dispuesto”, “RCD Reutilizado”, “Material Reciclado” y “Material Recurso Natural” a partir de la siguiente ecuación (Castellanos, 2005).

$$Tx = \left( \frac{V_f - V_i}{V_i} \right) * 100\%, \quad (1)$$

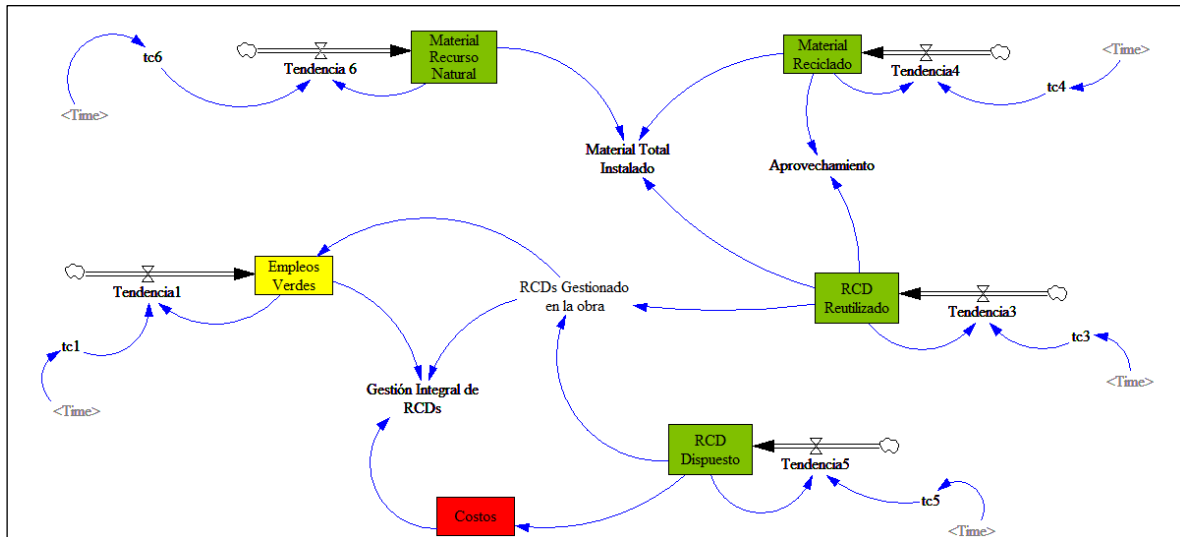
Tx: Tasa de Cambio

Vf: Valor Final

Vi: Valor Inicial



Figura 11. Modelo de simulación sobre la gestión integral de los RCD por parte de las áreas ejecutoras de contratos de obra del IDU.



Fuente: Autor, 2020.

A continuación, se describen en detalle los subsistemas económico, social y ambiental del modelo de simulación sostenible para los contratos previamente seleccionados, con el fin de dar a conocer la relación entre las variables y el origen de los datos insumo de cada subsistema.

En las figuras que acompañan el análisis de cada subsistema, la curva de la serie I representada en color azul indica el comportamiento de la variable sin aumentar el porcentaje de aprovechamiento establecido por la resolución 1115 del 2012, siendo está la realidad lograda en la ejecución de la obra; la curva de la serie II, representada en color rojo indica el comportamiento de la variable al aumentar el porcentaje de aprovechamiento a un 50%.

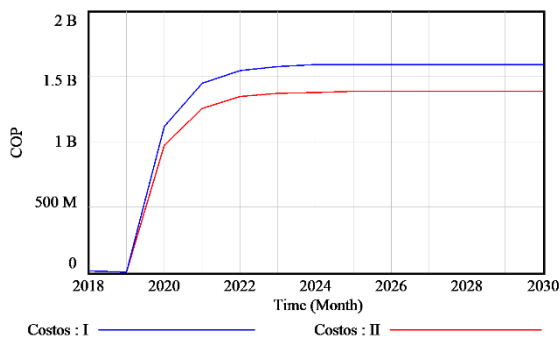
### 6.2.1 Subsistema Económico

El subsistema económico está compuesto por la variable de nivel “Costos”, la cual se alimenta de los datos obtenidos en la variable “RCD Dispuesto”. Esta relación es directamente proporcional ya que a mayor volumen de RCD dispuesto mayores costos asociados a su gestión. El costo utilizado para la simulación pertenece a los precios unitarios

de referencia establecidos por el Instituto de Desarrollo Urbano, el cual varía para cada contrato conforme al año de adjudicación. El precio unitario hace referencia al valor de un (1) m<sup>3</sup> dispuesto y transportado en un rango máximo de 28 km de distancia entre el lugar de origen a sitio de disposición final autorizado. El contrato No. IDU1385 del 2017 tiene un precio unitario de \$ 24.139 COP y el contrato No. IDU1300 del 2015 de \$ 18.364 COP.

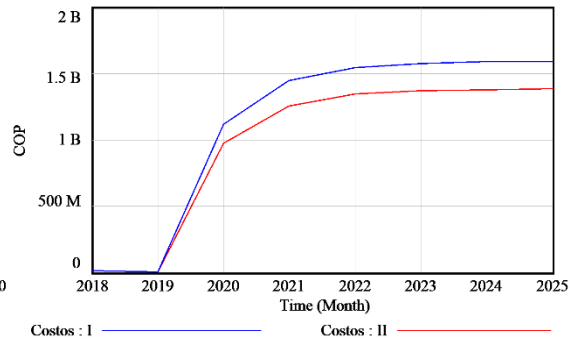
A continuación, se presentan las figuras 12 y 13, donde se evidencia el resultado de la simulación para ambos escenarios de la variable Costos, con una proyección a 2030 del contrato No. IDU1385 del 2017 (Figura 12). Es importante resaltar que en el análisis de esta variable se evidencia un mejor comportamiento en la curva hasta el año 2025 (Figura 13), debido a que el periodo de ejecución del contrato es de 24 meses y para realizar una simulación a largo plazo es necesario contar con un número mayor de datos. Conforme a lo anterior se decide realizar la simulación al año 2025 para todas las variables del contrato IDU1385 del 2017.

Figura 12. Simulación variable "Costos" 2030 – Contrato No. IDU 1385 del 2017.



Fuente: Autor, 2020.

Figura 13. Simulación variable "Costos" 2025 – Contrato No. IDU 1385 del

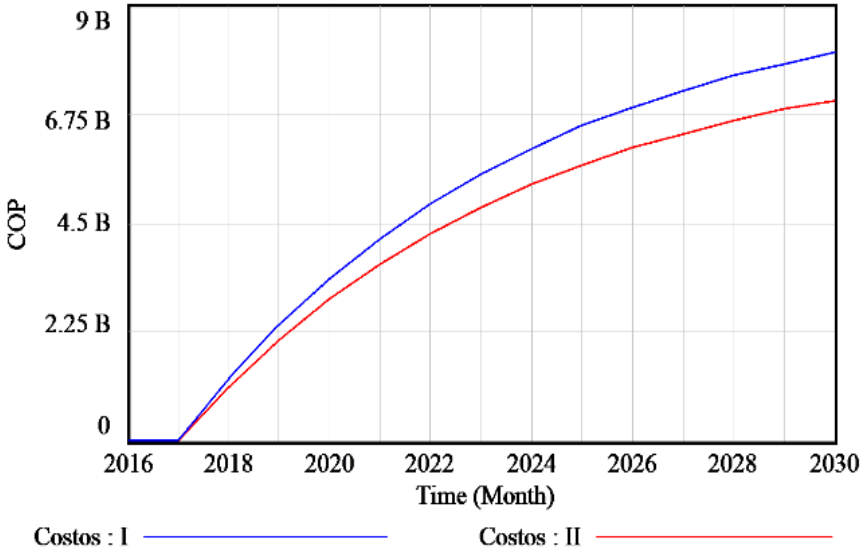


Fuente: Autor, 2020.

En la Figura 13 se observa que para el año 2020 en el escenario I el costo es de \$ 1.115.720.000 COP y de \$ 969.741.000 COP en el escenario II. Además, de acuerdo con la proyección del modelo de simulación, para el año 2025 se estima un costo de \$ 1.590.370.000 COP para el escenario I y de \$ 1.382.100.000 COP para el escenario II. Los costos disminuyen en comparación al escenario I, este comportamiento ocurre por la disminución de los volúmenes de disposición y el aumento en el aprovechamiento.

Por otra parte, en la Figura 14 se expone los costos del contrato No. IDU1300 del 2015. Los Costos en el año final de ejecución del contrato (2018) fueron de 1.280.150.000 COP para el escenario I y de \$ 1.123.820.000 COP para el escenario II. La proyección de costos del contrato al año 2030 del escenario I es de \$ 8.012.830.000 COP y del escenario II de \$ 7.033.460.000 COP. La variable Costos tiene el mismo comportamiento al del contrato anterior (contrato No. IDU1385) por su relación directa con el aprovechamiento y disposición de los RCD.

Figura 14. Simulación variable "Costos" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015.



Fuente: Autor, 2020.

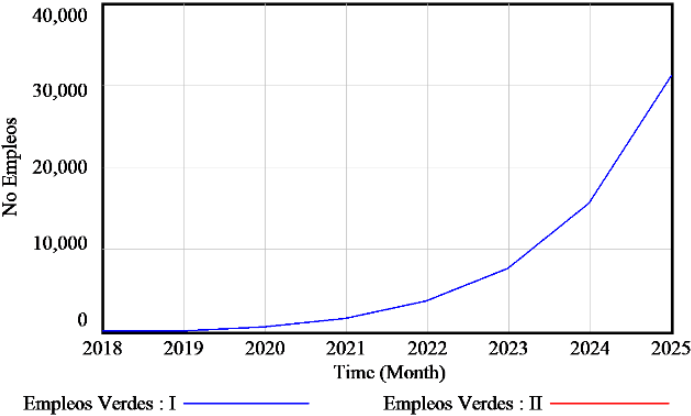
**6.2.2 Subsistema Social**

El subsistema social refleja el impacto de la gestión de los RCD sobre la generación de empleos verdes. Para la presente investigación se tienen en cuenta el número de personas desde el cargo profesional hasta mano de obra no calificada con el fin de alimentar la variable de nivel “Empleos Verdes”. Algunos de estos cargos corresponden a supervisor ambiental,

residentes ambientales de obra e interventoría, inspectores SISOMAS, brigadistas de orden, aseo y limpieza y transportadores de RCD.

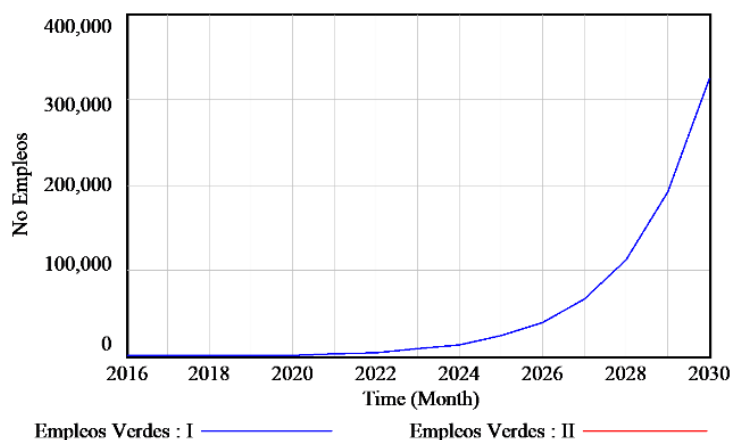
En la simulación de la variable se evidencia que no existen cambios en los valores para ambos escenarios dado que cualquier tipo de gestión de los RCD en la obra ya sea reutilización o disposición final se requiere personal que ejecute este tipo de actividades y quienes además desarrollan otro tipo de funciones diferentes a las de manejo de este tipo de residuo. De igual forma se presenta la condición que los contratos son desarrollados en diferentes frentes de obra y por esta razón se generan traslados y acopios de un lugar a otro. El número de empleos verdes para el contrato No. IDU 1385 en el año 2020 es de 547,48 y su proyección al año 2025 es de 31.160,7 (Figura 15). La simulación de la variable en el contrato No. IDU 1300 para el año 2030 es de 325.135 y en el año 2018 el número de empleos verdes fue de 248.128 (Figura 16).

Figura 15. Simulación variable "Empleos Verdes" 2025 – Contrato No. IDU 1385 del 2017.



Fuente: Autor, 2020.

Figura 16. Simulación variable "Empleos Verdes" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015.



Fuente: Autor, 2020.

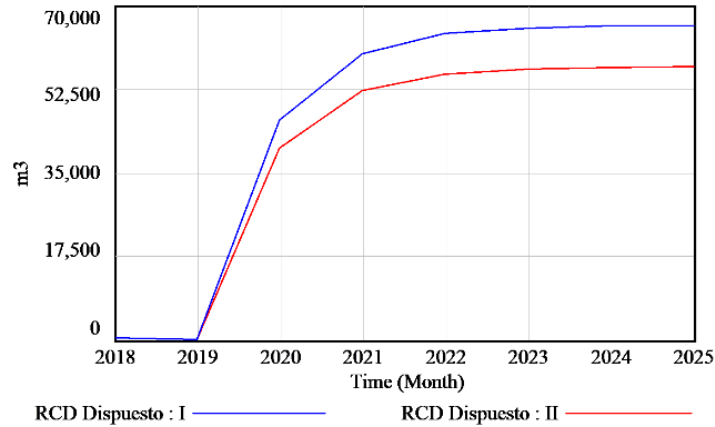
### 6.2.3 Subsistema Ambiental

En este subsistema se incluyen las variables de nivel: “RCD Dispuesto”, “RCD Reutilizado”, “Material Reciclado” y “Material Recurso Natural”. Esto con el fin de discriminar la gestión efectuada conforme a los lineamientos establecidos en la normativa ambiental vigente. La variable RCD Dispuesto esta alimentado por las variaciones en los volúmenes (tasa de cambio) dispuestos en centros de tratamiento y aprovechamiento, sitios de disposición final autorizados, otras obras IDU y entidades del distrito que fueron registrados en los meses de ejecución de cada obra seleccionada.

Para el caso del contrato No. IDU 1385 en el año 2020 se tiene un volumen de 46.220,6 m<sup>3</sup> en el escenario I y de 40.173,2 en el escenario II. Según el modelo de simulación se proyecta hacia el año 2025 un volumen de 65.883,9 m<sup>3</sup> para el escenario I y 57.255,9 m<sup>3</sup> para el escenario II (Figura 17). En el contrato No. IDU 1300 se genera una disposición de RCD en el año 2018 de 69.709,7 m<sup>3</sup> en el escenario I y de 61.196,8 m<sup>3</sup> en el escenario II. Además, la proyección de disposición al año 2030 es de 436.334 m<sup>3</sup> en el escenario I y 383.002 m<sup>3</sup> en el escenario II (Figura 18). En la simulación de la variable RCD Dispuesto se observa una diferencia importante entre el escenario I y II de ambos contratos, esto sucede

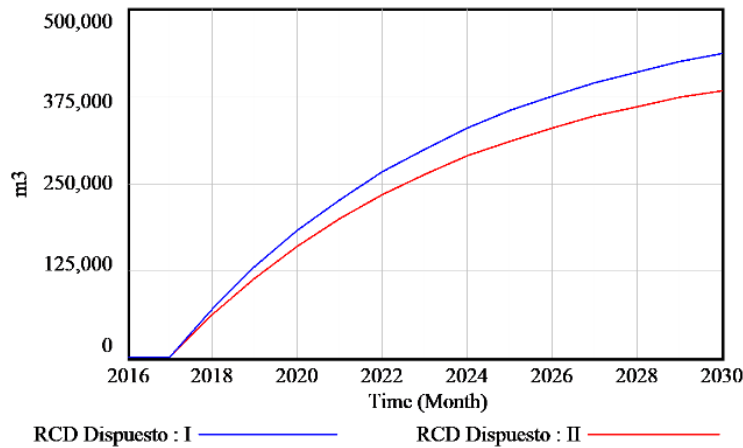
ya que se proyecta un mayor aprovechamiento de RCD en el escenario II y por lo tanto se reduce el volumen de RCD dispuesto.

Figura 17. Simulación variable "RCD Dispuesto" 2025 – Contrato No. IDU 1385 del 2017.



Fuente: Autor, 2020.

Figura 18. Simulación variable "RCD Dispuesto" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015.

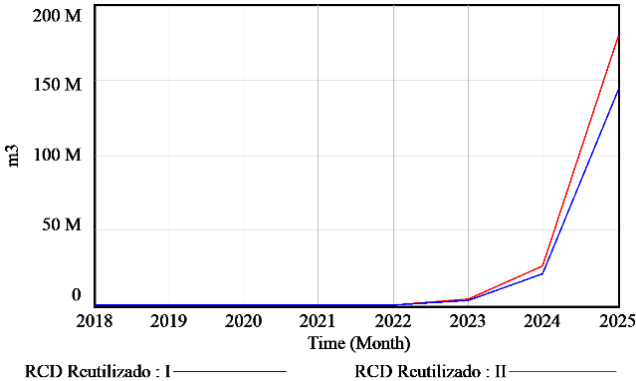


Fuente: Autor, 2020.

Para el caso de la variable de nivel RCD Reutilizado se tiene en cuenta las tasas de cambio de los volúmenes de RCD generado en la misma obra u otras obras IDU que es reincorporado en el proceso constructivo sin ningún tipo de tratamiento tal y como lo define

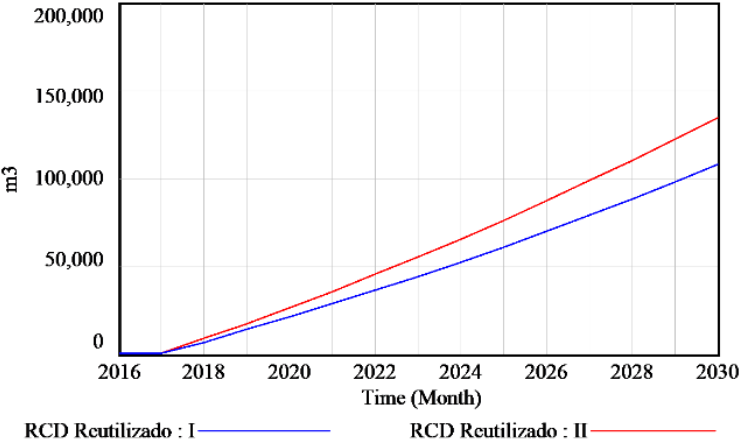
la resolución 01115 del 2012. Frente a los resultados de la simulación se identifica un aumento en la proyección al año 2025 para el contrato No. IDU 1385 de 143.035.000 m<sup>3</sup> en el escenario I a 179.236.000 m<sup>3</sup> en el escenario II (Figura 19). Además, en el contrato No. IDU 1300 se observa un aumento de 108.028 m<sup>3</sup> en el escenario I a 135.081 m<sup>3</sup> en el escenario II en su proyección al año 2030 (Figura 20), esto sucede ya que se aumenta el porcentaje de aprovechamiento para el escenario II.

Figura 19. Simulación variable "RCD Reutilizado" 2025 - Contrato No. IDU1385 del 2017.



Fuente: Autor, 2020.

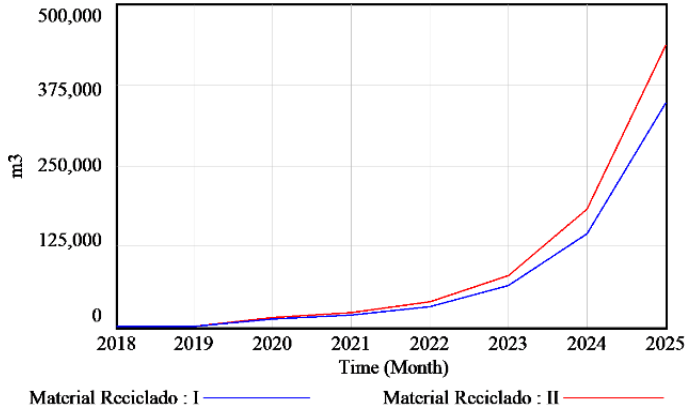
Figura 20. Simulación variable "RCD Reutilizado" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015.



Fuente: Autor, 2020.

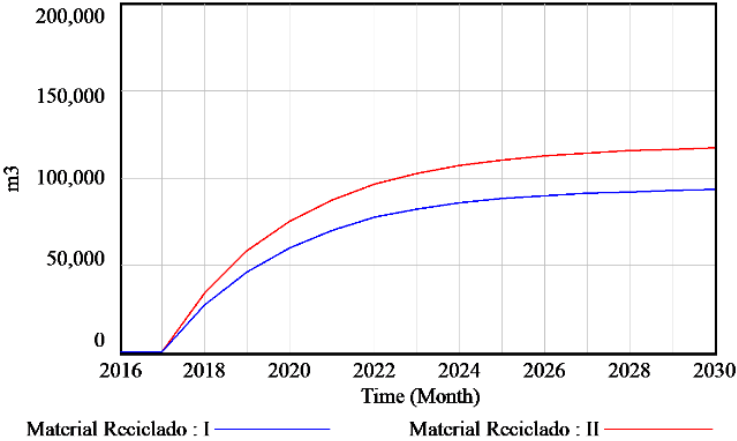
Asimismo, se ingresan las tasas de cambio de los volúmenes instalados mes a mes de materiales obtenidos de centros de tratamiento y aprovechamiento en la variable de nivel Material Reciclado. Al igual que los resultados de simulación de la variable RCD Reutilizado se genera un aumento en la proyección al año 2025 para el contrato No. IDU 1385 de 345.944 m<sup>3</sup> en el escenario I a 435.674 m<sup>3</sup> en el escenario II (Figura 21) y para el contrato No. IDU 1300 de 93.348,8 m<sup>3</sup> en el escenario I a 116.828 m<sup>3</sup> en el escenario II en su proyección al año 2030 (Figura 22), esto sucede ya que se aumenta el porcentaje de aprovechamiento para el escenario II.

Figura 21. Simulación variable "Material Reciclado" 2025 - Contrato No. IDU1385 del 2017.



Fuente: Autor, 2020.

Figura 22. Simulación variable "Material Reciclado" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015.



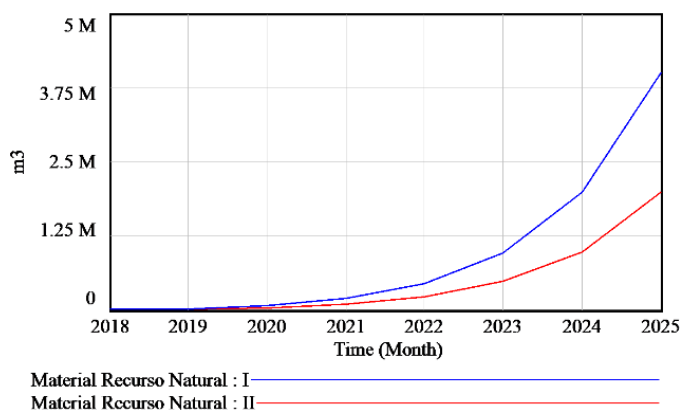
Fuente: Autor, 2020.



Por último, en la variable de nivel Material Recurso Natural se ingresan las tasas de cambio de las cantidades de materiales obtenidos en proveedores autorizados cuyo origen está basado en la explotación del recurso natural. Esta variable al ser simulada muestra la relación inversa que tiene con el aprovechamiento de RCD, ya que sustituye la necesidad de adquirir este material para la ejecución de las actividades de obra generando un impacto positivo en doble vía. La proyección al año 2025 para el contrato No. IDU 1385 es de 4.004.090 m<sup>3</sup> en el escenario I y de 1.991.470 m<sup>3</sup> en el escenario II (

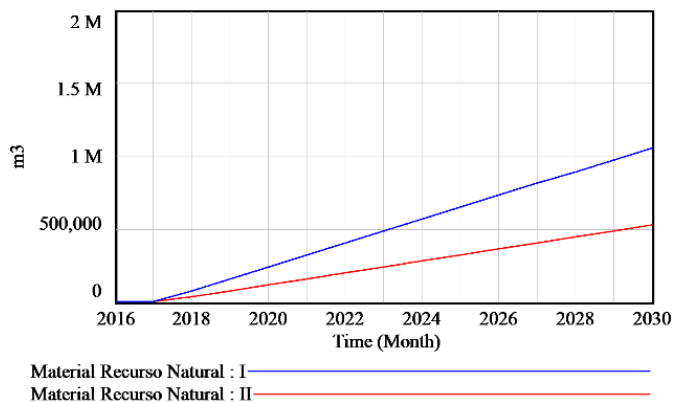
Figura 23) y la proyección al año 2030 para el contrato No. IDU 1300 disminuye de 1.059.430 m<sup>3</sup> en el escenario I a 530.202 m<sup>3</sup> en el escenario II (Figura 24).

Figura 23. Simulación variable "Material Recurso Natural" 2025 - Contrato No. IDU1385 del 2017.



Fuente: Autor, 2020.

Figura 24. Simulación variable "Material Recurso Natural" 2030 - Contrato No. IDU1300 del 2015.



Fuente: Autor, 2020.

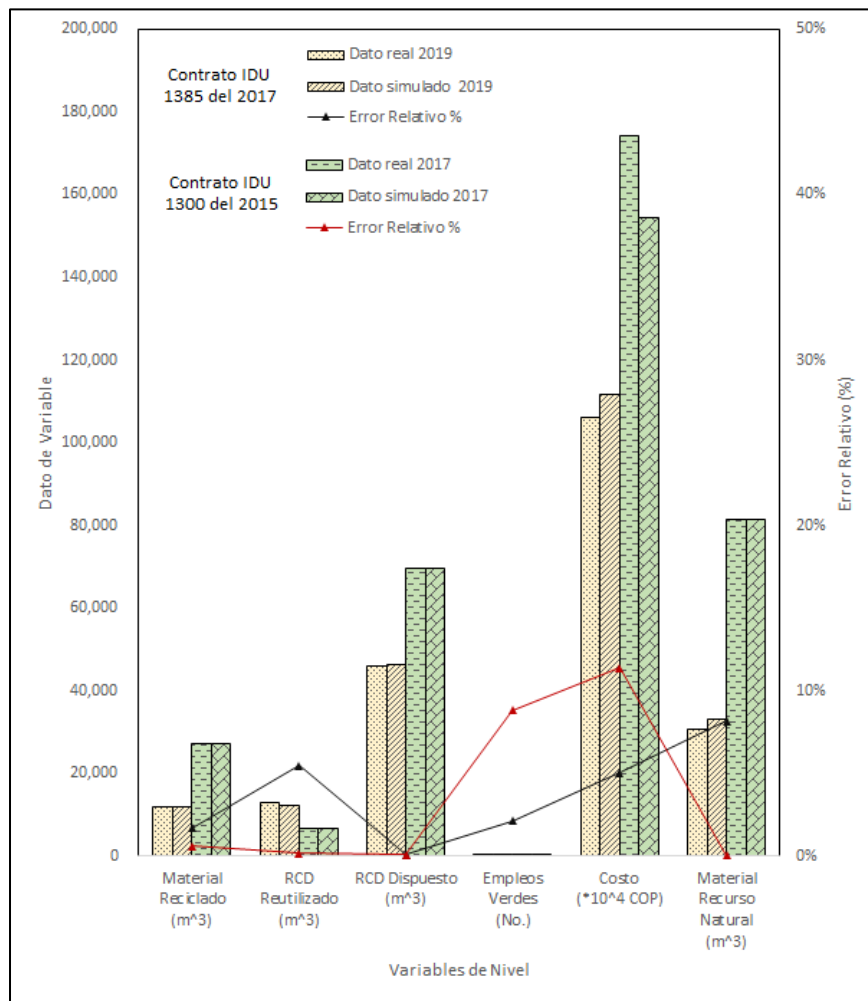
#### **6.2.4 Validación del Modelo de Simulación y Lineamientos**

La validación del modelo de simulación busca minimizar el porcentaje de error entre los datos reales y proyectados en cada escenario. Es por esto que se comparan los datos originales del año final de ejecución de cada contrato con los datos simulados para este mismo año. Para el caso del contrato No. IDU 1385 los datos reales del año 2019 de las variables de nivel (“Costos”, “Empleos Verdes”, “RCD Dispuesto”, “RCD Reutilizado”, “Material Reciclado” y “Material Recurso Natural”) se comparan con los datos simulados para el mismo año con el fin de validar el modelo.

En la Figura 25 se observan los datos de las variables del modelo de simulación para cada contrato con su porcentaje de error relativo, esto con el fin de identificar la probabilidad de errores en la proyección realizada. Se expresan los datos de la variable Costos en notación científica para mejorar la visualización de los datos. En el caso del contrato No. IDU 1385 para el año 2015 los valores simulados tienen  $\pm 8 \%$  de error comparado con los valores originales. La variable Material Recurso Natural tiene el mayor porcentaje de error relativo (8 %) y la variable RCD Dispuesto el menor porcentaje de error relativo (0,1 %).

Además, se realiza el mismo análisis para el contrato No. IDU 1300 teniendo en cuenta que los datos reales corresponden al año 2015. En la Figura 25 se observa que los valores simulados tienen  $\pm 11 \%$  porcentaje error comparado con los valores originales. La variable Costo tiene el mayor porcentaje de error relativo (11 %) y las variables RCD Reutilizado (0,2 %), RCD Dispuesto (0,1 %) y Material Recurso Natural (0,1) tienen el menor porcentaje de error relativo.

Figura 25. Validación del modelo de simulación sostenible.



Fuente: Autor, 2020.

En la construcción del modelo de simulación se evidencia la importancia de conocer el total del material instalado en la ejecución de la obra y como resultado se construye la variable auxiliar denominada Material Total Instalado que corresponde a la sumatoria de las variables Material Recurso Natural, RCD Reutilizado y Material Reciclado.

Además, con el fin de discriminar el origen de cada tipo de material utilizado en la ejecución de la obra se categorizan por recurso natural, reciclado y reutilizado siendo estos dos últimos los datos de insumo de la variable auxiliar Aprovechamiento según el concepto establecido en la normatividad ambiental vigente que para el año de la presente investigación corresponde a la resolución 01115 de 2012. Por otra parte, se integra al modelo la variable

auxiliar RCD Gestionado en la Obra, la cual denota el tipo de gestión efectuado al RCD generado en cada proyecto que en algunos casos fue disposición en centros de tratamiento y aprovechamiento, sitios de disposición final, reutilizado en la misma obra u otras obras IDU y otras entidades del distrito. Además, dicha variable se relaciona directamente con Empleos Verdes ya que sin mano de obra no es posible una adecuada gestión de estos residuos.

Finalmente, se considera la variable Gestión Integral de RCD, siendo esta de gran importancia ya que reúne los resultados de los tres subsistemas del modelo de simulación, los cuales engloban el ciclo de vida de dichos residuos conforme a los lineamientos establecidos en el distrito.

En síntesis, se identifican dieciocho lineamientos listados en categorías según su impacto cultural, económico, legal, tecnológico y ambiental, los cuales permiten una mejora en la gestión integral de RCD realizada hasta el día de hoy para la ciudad de Bogotá. Desde la política pública es importante fomentar una cultura de reciclaje a través de la aplicación de incentivos de orden económico, reconocimientos empresariales e institucionales y definir programas específicos que determinen el factor cultural y comportamentales de las sociedades y así definir cuáles son los patrones culturales que disminuyen la efectividad de las estrategias planteadas sobre el manejo de los RCD para potencializar su reciclado.

Asimismo, se deben reforzar mecanismos que promuevan el tratamiento y aprovechamiento de estos residuos para minimizar su disposición final, con el fin de aliviar efectivamente los problemas asociados a la gestión de residuos de construcción y demolición a través de algunos esquemas de combinación de penalizaciones, costos por disposición de residuos y subsidios, entre otros (Jia et al., 2017). De igual forma se debe incorporar a la gestión integral de los RCD otras entidades estatales que permitan mejorar su seguimiento y control en una condición normal y de pre-desastres, desastres y post-desastres de carácter natural o antrópico. Además, es importante proponer alianzas público-privadas que fortalezcan la gestión integral de los RCD y promover la interdisciplinariedad sobre la gestión integral de los mismos.

A partir de la revisión sistemática se logró establecer que de acuerdo con las motivaciones y particularidades del territorio se diferencia la eficiencia de las estrategias en la gestión de estos residuos. Se observa que se han desarrollado diferentes investigaciones sobre el manejo de estos residuos con un enfoque en economía circular (López Ruiz et al., 2020) y desarrollo sostenible (Prieto Sandoval et al., 2017), sin embargo, se encuentra una gran distancia entre el referente teórico y la realidad misma del sector constructivo. Esto sucede ya que al transformar este tipo de material no siempre cumple con las especificaciones técnicas para poder reemplazar en mayor medida los materiales de tipo natural. En segundo lugar, se habla que el sector construcción debe alcanzar lo que se define como economía circular y desarrollo sostenible, sin embargo, no se ha determinado una ruta de acción para su desarrollo e implementación.

Por otra parte, según los resultados obtenidos del modelo de simulación sostenible se puede confirmar que al aumentar el porcentaje de aprovechamiento a un 50%, los datos simulados de las variables son coherentes con un porcentaje de error relativo máximo de  $\pm 11\%$ . Esta mejora en el rango de aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición puede ayudar a aliviar la contradicción entre recursos de tierra y rellenos sanitarios en los recursos de rápida expansión (Jia et al., 2017). El análisis de las interacciones entre los subsistemas social, económico y ambiental en los contratos No. IDU 1385 de 2017 y No. IDU 1300 de 2015 demuestra su importancia en la gestión integral de los RCD. A pesar de la diferencia en el alcance de las ejecuciones de los contratos y de las magnitudes de generación de residuos y manejo de materiales la tendencia de los resultados simulados es similar, por lo cual se puede afirmar que dicho modelo es replicable desde los diferentes actores que hacen parte de la gestión de dicho material.

Al realizar la comparación de las variables entre un escenario y el otro se hace evidente que hay un impacto positivo en el segundo escenario por las siguientes razones: disminución en la cantidad de RCD dispuesto y en consecuencia en los costos asociados a esta actividad, por otra parte, disminución de la demanda de material proveniente de recurso natural y un aumento en la cantidad de RCD reutilizado y reciclado. Esto con el fin de que dicho sector productivo pueda acercarse a la economía circular y sostenibilidad buscando

fomentar el crecimiento, desarrollo económico y al mismo tiempo, asegurar que los bienes naturales continúen proporcionando los recursos y los servicios ambientales de los cuales depende nuestro bienestar (OCDE, 2012).

Finalmente, se realiza la validación del modelo de simulación sostenible y los lineamientos de mejora para la gestión de los RCD resultantes de la investigación a partir de un grupo de expertos, el cual inicia con la invitación vía correo electrónico el día 18 de noviembre del 2020 y se lleva a cabo el día 01 de diciembre de 2020. Este panel de expertos se conformó por 7 participantes que representan los principales actores en la gestión de los RCD en un contexto nacional e internacional, quienes son: Alejandra Tapia, participante en el programa Construye 2025 de Chile el cual busca mejorar la productividad y sustentabilidad en la construcción; Mónica Gutiérrez, quien actualmente labora en el IDU como apoyo en la supervisión ambiental; Martha Patricia Molina, quien ha trabajado en la SDA sobre la normatividad aplicable a los RCD; Pablo González, quien hace parte de la Asociación Española de Reciclaje y Construcción; Carlos Jaime Orozco, quien ha participado en la elaboración de los planes de gestión de RCD en obra y desde la SDA en la estructuración del decreto 586 de 2015; Cesar Cárdenas, actualmente labora en el IDU realizando la supervisión de contratos del área de construcción y Cesar Villamil, director de operaciones de la planta de aprovechamiento de GRECO ubicada en Cota desde el año 2016. Los consentimientos informados de los expertos que participaron en la validación, se podrán encontrar en el Anexo D del documento.

En la discusión del panel de expertos salieron los siguientes aportes y observaciones al modelo de simulación sostenible y a los lineamientos previamente planteados:

- Incluir en el modelo de simulación sostenible una variable con el aspecto cultural en donde se pueda observar el impacto de la capacitación del recurso humano sobre la gestión integral de los RCD.
- En el modelo de simulación sostenible se observan los actores principales en la gestión de los RCD como los generadores, sitios de disposición final y aprovechamiento, sin embargo, no hay que dejar de lado actores que impactan la

gestión de los RCD como los recicladores, los cuales pueden ser aliados en la cadena de valor de este tipo de material.

- Articular los lineamientos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ya que la adecuada gestión de los RCD apunta a su cumplimiento.
- Apalancar de manera legal a los generadores para que hagan una separación adecuada de los RCD en obra.
- Se recomienda que en la propuesta del cambio normativo sobre el porcentaje de aprovechamiento sea aplicable solo a los proyectos de infraestructura vial y espacio público.
- Frente a la propuesta de la metodología tarifaria sobre el manejo y disposición de estos residuos se debe tener en cuenta que no existe un interés por parte del servicio público y por el contrario la oportunidad es la vinculación de estrategias que permitan ampliar los beneficios tributarios, tales como: exenciones tributarias, exclusión o disminución del IVA, tasas preferenciales para préstamos bancarios para aquellos centros de tratamiento que quieran mejorar su sistema empresarial.
- Se recomienda establecer porcentajes de aprovechamiento de RCD según el tipo de intervención, considerando que no todos los tipos de obra tienen la misma oportunidad de aprovechamiento.

A partir de la discusión desarrollada en el panel de expertos se modifican y se agregan lineamientos, es así como se construyen dieciocho lineamientos, los cuales buscan mejorar la gestión de los residuos de construcción y demolición en Bogotá, contribuyendo a la economía circular y la sostenibilidad (Tabla 11).

Tabla 11. Lineamientos para la gestión de los RCD en Bogotá.

<b>Categoría</b>	<b>Responsable</b>	<b>Lineamientos</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Cultural</b>	Autoridades ambientales	Promover hacia la comunidad y las autoridades una imagen pública de reconocimiento empresarial e institucional a aquellas que cumplan con una participación activa e	Certificación y divulgación en canales públicos por la autoridad ambiental competente.

<b>Categoría</b>	<b>Responsable</b>	<b>Lineamientos</b>	<b>Instrumento</b>
		innovadora en la cadena de valor de los RCD.	
	Autoridades ambientales	Promover la interdisciplinariedad sobre la gestión integral de los RCD.	Fomentar espacios que permitan la articulación entre la academia y el sector productivo.
	Autoridades ambientales y Gremio de constructores (CAMACOL)	Fomentar eventos de carácter académico y profesional con el fin de tener una puesta en común de los progresos, investigaciones y tendencias de la gestión integral de los RCD.	Cumbres y congresos.
	Academia	Incluir en las instituciones educativas instrumentos o actividades de formación articuladas a distintos niveles, la capacitación de personal de obra el manejo de los RCD.	Clases en Instituciones de Educación.
	Sector infraestructura	Fomentar alianzas estratégicas con el gremio de recicladores en la cadena de valor de este tipo de material.	Programas de inclusión proyectados desde el plan de gestión de RCD.
<b>Económico</b>	DNP	Como se ha observado en oportunidades anteriores, el DNP cuenta con las facultades para dinamizar mecanismos para empresas e instituciones que hagan parte de la gestión integral de los RCD a concursar en programas y convocatorias financieras promovidas por el estado.	Inclusión de dichos programas y convocatorias en los planes de desarrollo del estado.
	Autoridades ambientales	Promover la agremiación de los actores que intervienen en la cadena de gestión de RCD para el establecimiento de	Fiducia.



<b>Categoría</b>	<b>Responsable</b>	<b>Lineamientos</b>	<b>Instrumento</b>
		metas medibles en torno a dicha gestión.	
	SDA	Promover mecanismos para desincentivar la disposición final a través de la mejora de la cuota del mercado competente. Generar requisitos de recibo en los sitios de disposición final, cumplimiento de normativa que garantice la no contaminación del agua, suelo, aire en el lugar de disposición.	Actualización y modificación de resoluciones aplicables vigentes (Res. 01115 de 2012).
	Gobierno y Autoridades ambientales	Fomentar cobros coherentes conforme al impacto generado desde una vista ambiental, promoviendo así a la sociedad a generar propuestas de reciclado de la cual nos encontramos distantes.	Estandarización de costos por disposición en sitios autorizados.
	Gobierno y Autoridades ambientales	Fomentar incentivos como certificaciones y beneficios tributarios que favorezcan a los actores que hacen parte de la gestión integral de los RCD.	Exenciones tributarias, exclusión o disminución del IVA, tasas preferenciales para préstamos bancarios para aquellos centros de tratamiento que quieran mejorar su sistema empresarial.
<b>Legal</b>	Gobierno y Autoridades ambientales	Promover desde la normativa ambiental específica sobre la gestión integral de RCD la obligatoriedad de contar con la certificación y reconocimiento otorgado por la autoridad ambiental competente.	Actualización y modificación de resoluciones aplicables vigentes (Res. 01115 de 2012).

<b>Categoría</b>	<b>Responsable</b>	<b>Lineamientos</b>	<b>Instrumento</b>
	Autoridades ambientales	Proponer alianzas público-privadas que fortalezcan la gestión de los RCD.	Resoluciones que determinen las condiciones.
	Gobierno y Autoridades ambientales	Proponer aumentos en los porcentajes de aprovechamiento hasta alcanzar un valor del 50% en los proyectos de infraestructura vial y espacio público.	Actualización y modificación de resoluciones aplicables vigentes (Res. 01115 de 2012).
<b>Ambiental</b>	Autoridades ambientales	Desarrollar mecanismos para determinar el costo por la adecuada e inadecuada gestión integral de RCD, desde las variables de desarrollo sostenible (costo ambiental, costo social y costo económico)	Estandarización desde la normativa ambiental competente.
	Autoridades ambientales	Articular o incorporar a la gestión integral de los RCD otras entidades estatales que permitan mejorar su seguimiento y control, como por ejemplo IDIGER.	Programas para el manejo de los RCD en la atención de pre-desastres, desastres y post-desastres de carácter natural o antrópico.
	Autoridades ambientales y sector educativo	Proponer líneas de investigación sobre el uso de este tipo de residuos en el sector construcción y otros sectores de la economía (ejemplo: agrícola, maderero, manufactura, entre otros).	Alianzas con entidades de investigación.
<b>Tecnológico</b>	Autoridades ambientales	Robustecer las recomendaciones técnicas para el uso amplio de los productos derivados de los RCD, de manera que se tengan múltiples opciones, como por ejemplo especificaciones del IDU, normas NTC, entre otras.	Adquisición e implementación de nuevas tecnologías, ensayos de laboratorio y fichas técnicas.

Categoría	Responsable	Lineamientos	Instrumento
	Autoridades ambientales y sector constructor	Fomentar el uso de herramientas tecnológicas innovadoras que faciliten la gestión integral de RCD y que permitan identificar las externalidades producto de la actividad, como por ejemplo la usada en la presente investigación (dinámica de sistemas para el modelado y análisis de escenarios y proyecciones futuras); también se pueden explorar tecnologías en el mercado para el control de la generación de RCD (cuantificación), trituradoras en obra (aprovechamiento in situ para ahorro en costos de transporte), entre otras.	Adquisición e implementación de nuevas tecnologías.

Fuente: Autor, 2020.

## 7 CONCLUSIONES

En la ciudad de Bogotá se han aplicado diferentes estrategias como la reutilización y el reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD) para lograr la reincorporación de este tipo de material en el sector de la construcción. Sin embargo, pese a los esfuerzos realizados por parte de todos los actores involucrados en el manejo de los RCD, no se ha logrado un porcentaje de aprovechamiento óptimo de dichos residuos, pues desde la política pública se estableció como máximo un 25% de aprovechamiento desde el año 2012, llegando a 16% en el año 2020. Países como China, España y Países Bajos reportan un importante aprovechamiento de este tipo de material alcanzando unos porcentajes entre 50 % y 70 %, lo cual denota una alta eficiencia en los procesos planteados y un camino por recorrer para Colombia.

Así mismo, el análisis desarrollado del panorama internacional a nivel de gestión de RCD, permitió determinar que en Bogotá existe una importante oportunidad de mejora en este aspecto, determinándose entonces que la economía circular se constituye como el medio que facilitaría la introducción de Bogotá y sus obras de infraestructura vial hacia un enfoque de sostenibilidad, enfoque que generaría impactos significativos a nivel social, económico y ambiental. Se observa como un importante marco de referencia la gestión que realiza actualmente Holanda, país que logra aprovechar el 90% de sus RCD (Bogotá aprovecha tan solo un 16%); pero, si bien se constituye como un modelo representativo, es importante entender que el modelo no se puede replicar en su totalidad, ya que las condiciones del contexto son totalmente diferentes, por su parte, Holanda ha logrado consolidar su economía circular en el sector constructor, a partir de todo un rastro histórico de gestión que no puede compararse con la gestión en Colombia, donde apenas se empieza a observar voluntad política al tema de sostenibilidad y economía circular en obras de infraestructura vial. De acuerdo con lo anterior, no es posible traer el modelo completo a la ciudad de Bogotá, pero si es posible tomar como referencia algunos lineamientos que han permitido a países como Holanda y a otros países europeos, lograr aprovechar más del 50% de sus RCD.

El objetivo fundamental de esta investigación fue formular lineamientos sobre la gestión integral de los RCD, elementos esenciales para contribuir a la sostenibilidad en Bogotá Distrito Capital. Así pues, el aporte principal de este trabajo consiste en la creación de una base de datos que contiene una lista detallada de investigaciones a nivel nacional e internacional sobre la gestión de los RCD; en segundo lugar, el diseño y aplicación de un modelo de simulación sostenible para analizar el comportamiento futuro del manejo de dichos residuos, convirtiéndose en una herramienta novedosa para el sector de la construcción y como último aspecto la formulación de lineamientos.

Como resultado de la revisión sistemática de documentos y de la aplicación del modelo de simulación sostenible, se identificaron cinco oportunidades de mejora en la gestión de RCD adelantada en Bogotá: (1) fomentar cambios culturales de la ciudadanía en general, la institucionalidad y promover compromiso de las mismas para disminuir las presiones al ecosistema producto de la inadecuada gestión de estos residuos, (2) promover

incentivos financieros que dinamicen económicamente el sector y establecer cobros coherentes frente al impacto negativo generado desde una postura ambiental y de rentabilidad, (3) fortalecer la política pública existente, siendo esta la de mayor oportunidad en lograr ya que en nuestro país la responsabilidad de cumplir nos obliga a participar de manera activa en los procesos de cambio, (4) ampliar el uso de herramientas tecnológicas novedosas y de bajo costo, así como las que permitan la toma de decisiones y mejora en los procesos que inciden en la adecuada gestión de este tipo de material, (5) fomentar dentro de la gestión de los residuos de construcción y demolición el posicionamiento estratégico del componente ambiental para la toma de decisiones. Es así, como nace la formulación de los lineamientos con el fin de mejorar la gestión de los RCD en Bogotá.

Las principales limitaciones de la investigación fueron determinar los costos asociados a la gestión de los RCD, ya que en la normatividad vigente (Resolución 01115 de 2012) no se indica como debe ser esta valoración de manera unificada y en consecuencia se lleva a cabo una aproximación de carácter subjetivo. En la presente investigación la variable de costos asociados a la gestión de los RCD se alimenta conforme al precio del  $m^3$  de RCD transportado y dispuesto, quedando por fuera las inversiones de los insumos tales como plásticos, herramientas menores, trasiegos, arriendos para acopio, lonas con relleno de material para confinamiento, personal encargado, entre otros. Sumado a los anterior, otro limitante corresponde a los tiempos de ejecución de los contratos, ya que son de periodos de corto a mediano plazo y por tanto la cantidad de datos no es significativa aumentando el porcentaje de error relativo de la simulación a un mayor número de años.

Además, para la variable de gestión de empleos verdes se identifica que se tiene una limitada base de datos ya que no se cuenta con el total de empleos que se fomentan alrededor de la gestión de los RCD tales como los aportados por las autoridades en el ejercicio de seguimiento y control, sitios de disposición final y centros de tratamiento y aprovechamiento. Las variables de mayor complejidad son Empleos Verdes y Costos porque no se observan cambios significativos en la simulación realizada. Por otra parte, de acuerdo con los aportes del grupo de expertos se resalta la importancia de considerar en el modelo de simulación sostenible el aspecto cultural, en donde se pueda observar el impacto de la capacitación del

recurso humano sobre la gestión integral de los RCD. Como consecuencia de lo anterior, se identifica que es importante desarrollar dos líneas de investigación donde se recolecten datos para la formulación de una variable de nivel con el aspecto cultural y se formule un plan para la cuantificación del costo ambiental.

## 8 REFERENCIAS

- Aguilar, M. (2009). *Reciclamiento de Basura. Una opción ambiental comunitaria*. Ciudad de Mexico: Trillas.
- Alfonso, M. J. (2003). Turismo, cultura y medio ambiente. *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 1(2), 145-153. Recuperado el 20 de 2 de 2021, de <http://pasosonline.org/publicados/1203/ps020603.pdf>
- Artaraz, M. (2002). *Ecosistemas*. Recuperado el 21 de 2 de 2021, de <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/614>
- Artaraz, M. (2002). *Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible*. Recuperado el 21 de 2 de 2021, de <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/614>
- Barroso, V. (2013). *Universidad de Sevilla*. Obtenido de biblioteca de ingeniería: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30186/fichero/Cap%C3%ADtulo+12.pdf>
- Basoalto, H., Cerda, C., Mora, P., Pérez, L., & Riviera, F. (2010). Memoria e Identidad Local después de un Terremoto: Reciclaje de Escombros Simbólicos y su Uso. *Arquitecturas del sur*, 84-95.
- Castrillón, J., & Valencia, J. (2018). Propuesta de modelo en dinámica de sistemas para la toma de decisiones en la selección de proyectos verdes. *Mutis*, 84-94.
- CORFO. (2020). *Estrategia sustentable*. Obtenido de Entrevistas: <http://construye2025.cl/rcd/2019/05/08/gestion-de-residuos-una-enorme-oportunidad-de-mejora-para-la-industria-de-la-construccion/>
- DNP. (2019). *Superservicios*. Obtenido de Publicaciones: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe\\_nacional\\_disposicion\\_final\\_2019\\_1.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_nacional_disposicion_final_2019_1.pdf)
- Durán, R., & Garzón, M. (2016). *Universidad La Salle*. Obtenido de Repositorio: [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1773/1/DENTIFICACION\\_DE\\_ALTERNATIVAS\\_PARA\\_LA\\_GESTION\\_DE\\_RCD.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1773/1/DENTIFICACION_DE_ALTERNATIVAS_PARA_LA_GESTION_DE_RCD.pdf)

- Ebel, R., & Kissmann, S. (2011). Desarrollo sostenible: La investigación en un contexto intercultural. *Ra Ximhai*, 7(1), 69-79. Recuperado el 21 de 2 de 2021, de <http://journals.unam.mx/index.php/rxm/article/view/26667>
- Horrach, J. (2017). *iresiduo*. Obtenido de <https://iresiduo.com/blogs/juan-mateo-horrach/otros-modelos-gestion-residuos-amsterdam-holanda>
- ICONTEC. (20 de Mayo de 2009). *ICONTEC*. Obtenido de <http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/GTC%2024%20DE%202009.pdf>
- IDU. (2020). *Bogotá*. Obtenido de Instituto de Desarrollo Urbano: <https://www.idu.gov.co/blog/boletin-de-prensa-idu-1/post/alrededor-de-10-billones-invertira-el-idu-en-la-construccion-de-nuevas-obras-para-los-ciudadanos-1320>
- Izquierdo, L., Galán, J., Santos, J., & Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *EMPIRIA. Revista de Metodología de las Ciencias Sociales*, 85-112. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2971/297124024004.pdf>
- J Yang, J. H. (2007). A simulation model using system dynamic method for construction and demolition waste management in Hong Kong. *Construction Innovation, 2007 - emerald.com*.
- Mackenzier, D. (2005). *Ingeniería y Ciencias ambientales*. McGraw Hill .
- Marín, J. (2019). *Universidad Javeriana*. Obtenido de Repositorio: [http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/12383#:~:text=De%20acuerdo%20con%20Minambiente%20\(2019,es%20de%2022'270.338%20ton.&text=La%20generaci%C3%B3n%20total%20de%20residuos,y%20de%20317%20kg%20Fm2](http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/12383#:~:text=De%20acuerdo%20con%20Minambiente%20(2019,es%20de%2022'270.338%20ton.&text=La%20generaci%C3%B3n%20total%20de%20residuos,y%20de%20317%20kg%20Fm2).
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Ministerio del Medio Ambiente*. Obtenido de [www.minambiente.gov.co/](http://www.minambiente.gov.co/)
- Montes Ponce de Leon, J. (2001). *Medio Ambiente y desarrollo Sostenido*. Universidad Pontificia. Obtenido de <https://www.casadellibro.com/libro-medio-ambiente-y-desarrollo-sostenido/9788484680338/814628>



- Muñoz, C., Rivero, C., Marrero, M., & Cereceda, G. (2019). Urbanización de viviendas y gestión ecoeficiente de residuos de construcción en Chile: aplicación del modelo español. *Revista Ambiente Construido*, 275-294.
- ONU. (2018). *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe*. Obtenido de [https://www.magconsultorias.com/wp-content/uploads/2018/10/UN\\_Manejo-de-residuos-PREVIEW19-ilovepdf-compressed.pdf](https://www.magconsultorias.com/wp-content/uploads/2018/10/UN_Manejo-de-residuos-PREVIEW19-ilovepdf-compressed.pdf)
- Oviedo, S., Leiva, A., Diaz, D., & Forradellas, R. (2013). Dinámica de sistemas: modelado flexible en logística inversa. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 5(10), 84-98. Recuperado el 16 de 3 de 2021, de <http://42jaiio.sadio.org.ar/proceedings/simposios/trabajos/sii/17.pdf>
- Pacheco, C., Fuentes, L., Sánchez, E., & Rondón, H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. *Revista Ingeniería y desarrollo*, 35(2). Obtenido de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/852/85252030015/html/index.html>
- Peña, A. Q. (2006). *Metodología de Investigación Científica Cualitativa*. Recuperado el 16 de 2 de 2021, de <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx:8080/jspui/handle/123456789/2724>
- Ramírez, L. (Diciembre de 2020). *Bogotá*. Obtenido de Obras: <https://bogota.gov.co/asi-vamos/obras/logros-del-idu-en-el-2020-ayudaran-obras-de-infraestructura>
- Republica, P. d. (06 de Agosto de 2002). *Alcaldía de Bogotá*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5542>
- Rojo, T. (1991). *La sociología ante el medio ambiente*. Recuperado el 20 de 2 de 2021, de <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/44624>
- SDA. (2018). *Alcaldía Mayor de Bogotá*. Obtenido de <http://www.ambientebogota.gov.co/es/web/escombros#:~:text=Actualmente%20el%20distrito%20tiene%20como,conlleva%20a%20una%20p%C3%A9rdida%20de>
- SDA. (2019). *Diagnóstico Sectorial*. Bogotá D.C.

- Secretaría de Estado de Medio Ambiente. (2008). *Comunidad de Madrid*. Obtenido de Medio ambiente: [https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/5\\_plan\\_de\\_gestion\\_de\\_residuos\\_de\\_construccion\\_y\\_demolicion.pdf](https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/5_plan_de_gestion_de_residuos_de_construccion_y_demolicion.pdf)
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2016). *Bogotá D.C., hacia una nueva cultura en la gestión integral de los residuos de construcción y demolición*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). *Ambiente Bogotá*. Obtenido de Alcaldía Mayor de Bogotá: <http://www.ambientebogota.gov.co/es/web/escombros>
- Secretaría Distrital de Planeación. (2017). *Alcaldía Mayor de Bogotá*. Obtenido de Secretaría Distrital de Planeación: [http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/diagnostico\\_de\\_la\\_huella\\_urbana\\_de\\_bogota\\_y\\_20\\_municipios\\_de\\_1997\\_a\\_2016.pdf](http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/diagnostico_de_la_huella_urbana_de_bogota_y_20_municipios_de_1997_a_2016.pdf)
- Sgreccia, E., & Tortoreto, D. (2005). *El desarrollo sostenible: consideraciones éticas*. Recuperado el 20 de 2 de 2021, de <https://philpapers.org/rec/sgreds>
- Suarez, C., Betancourt, C., Molina, J., & Mahecha, L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. *Revista Entramado*, 15(1), 224–244. doi:10.18041/1900-3803/entramado.1.5408
- Tapias, J. (2017). *Universidad Santo Tomás*. Obtenido de Repositorio: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10696/Guia%20de%20intervencion%20sostenible%20de%20los%20residuos%20de%20la%20construccion%20de%20la%20construccion.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Tascón, D. (2017). *Universidad Distrital*. Obtenido de Repositorio: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6318>
- UMV. (2010). *La Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación Y Mantenimiento Vial*. Obtenido de Documentos.
- Ying, L. (2011). Source Management Policy of Construction Waste in Beijing. *Procedia Environmental Sciences* 11, 880 – 885.

- Abarca-Guerrero, L., Maas, G., & van Twillert, H. (2017). Barriers and Motivations for Construction Waste Reduction Practices in Costa Rica. *Resources*, 6(4), 69.  
<https://doi.org/10.3390/resources6040069>
- Abbaspour, H., Drebenstedt, C., Badroddin, M., & Maghaminik, A. (2018). Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(6), 839–848.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.009>
- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: Conceptos, Problemas Y Estrategias. *Dearq*, 4, 14–23. <https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.02>
- Bravo, J., Valderrama, C., & Ossio, F. (2019). Economic assessment of the construction waste of a highrise building: A case study [Cuantificación económica de los residuos de construcción de una edificación en Altura: Un Caso de Estudio]. *Informacion Tecnologica*, 30(2), 85–93. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062854701&doi=10.4067%2FS0718-07642019000200085&partnerID=40&md5=5c2ed78e3fdb0367a5e9514601d0f9d4>
- Brundtland, G. H. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. In *Naciones Unidas* (p. 416). Naciones Unidas.
- Castaño, J. O., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. *Revista Tecnura*, 17(38), 9.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09>
- Castellanos, M. R. (2005). Procesos de transformación urbana: El caso de Tunja 1900-2005. *Perspectiva Geográfica*, 14(1), 13–44.
- Cerchiaro Daza, L. A. (2018). *Configuración de la política pública del manejo de residuos de construcción y demolición en Bogotá D.C.* 182.

<https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/1456>

Córdoba, R. E., Marques Neto, J. da C., Santiago, C. D., Pugliesi, E., & Schalch, V. (2019). Alternative construction and demolition (C&d) waste characterization method proposal. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(1), 199–212.  
<https://doi.org/10.1590/s1413-41522019179720>

Cortés, J. E. (2019). *Propuesta de acciones para una adecuada gestión de residuos generados por el rubro de la construcción y demolición*. 53(9), 1–30.

Cruz-Solano, D., Motta-Morales, J., & García-Ubaque, C. A. (2017). Estimación de la pérdida de área en los humedales de Bogotá en las últimas cinco décadas debido a la construcción y sus respectivos efectos. *Documento de Trabajo, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*.  
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5345/1/CruzSolanoDianaPaola2017.pdf>

Dangerfield, B. (2014). Systems thinking and system dynamics: A primer. *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*, 29–51.  
<https://doi.org/10.1002/9781118762745.ch03>

Degres, L., Pierreval, H., & Caux, C. (2004). Simulation of Steel Industry using System Dynamics. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(4), 461–466.  
[https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36157-8](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36157-8)

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2019). *Censo nacional de población y vivienda (CNPV)*. Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE).

Duran, D. C., Artene, A., Gogan, L. M., & Duran, V. (2015). The Objectives of Sustainable Development - Ways to Achieve Welfare. *Procedia Economics and Finance*, 26(15), 812–817. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)00852-7](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00852-7)

Forrester, J. W. (1969). *Urban dynamics*. M.I.T. Press.

- Gálvez-Martos, J. L., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 136(December 2017), 166–178.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>
- González Angarita, G. P. (2018). *El impacto de la dinámica urbana sobre los humedales de bogotá (colombia). Análisis, modelización y propuestas en el marco del crecimiento verde*. Universidad de Zaragoza.
- Hao, J. L., Hills, M. J., & Huang, T. (2007). A simulation model using system dynamic method for construction and demolition waste management in Hong Kong. *Construction Innovation*, 7(1), 7–21.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1108/14714170710721269>
- Harari, M. B., Parola, H. R., Hartwell, C. J., & Riegelman, A. (2020). Literature searches in systematic reviews and meta-analyses: A review, evaluation, and recommendations. *Journal of Vocational Behavior*, 118(January 2019), 103377.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvb.2020.103377>
- Hedstrom, G. S. (2018). Sustainability: What it is and how to measure it. *Sustainability*.
- Hendriks, C. F., & Janssen, G. M. T. (2001). Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions. *Heron*, 46(2), 109–117.
- Herrera Araújo, F., Ardila Lara, M. A., Gutiérrez Gil, E., & Herrera Téllez, D. (2018). ODS en Colombia: Los retos para 2030. *Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo (PNUD)*, 74.
- Jia, S., Yan, G., Shen, A., & Zheng, J. (2017). Dynamic simulation analysis of a construction and demolition waste management model under penalty and subsidy mechanisms. *Journal of Cleaner Production*, 147, 531–545.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.143>
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and

recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>

Koffel, J. B. (2015). Use of recommended search strategies in systematic reviews and the impact of librarian involvement: A cross-sectional survey of recent authors. *PLoS ONE*, 10(5), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125931>

Krueger, R. A., & Casey, M. A. (2014). *Focus Groups: A Practical Guide for Applied Research* (5th ed.). Thousand Oaks, California : SAGE.

López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>

Lorenzo Espejo, A. (2018). *Dinámica de sistemas para la simulación de técnicas híbridas de control de la producción*. Universidad de Sevilla.

Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E., & Claros, N. (2013). Revisión sistemática de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cirugía Española*, 91(3), 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2011.07.009>

Martín Carretero, J. M. (2019). Economía circular, un nuevo paradigma para nuestras ciudades. *Tiempo de Paz*, 132, 23–32.

Marzouk, M., & Azab, S. (2014). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 82, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015>

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things* (North Poin).

Medina, E. (2019). *Todo lo que debes saber sobre Bogotá en 2019*. Alcaldía de Bogotá.

- Mejía Restrepo, E., Bedoya, L., & Vega, N. (2015). Una Opción Para La Recuperación De Suelos. *Revista EIA*, 12(2), 55–60.
- Michellini, G., Moraes, R. N., Cunha, R. N., Costa, J. M. H., & Ometto, A. R. (2017). From Linear to Circular Economy: PSS Conducting the Transition. *Procedia CIRP*, 64, 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.012>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), 1006–1012. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.005>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Munasinghe, P. C. M. (1993). *Environmental economics and sustainable development* (Issue 3). The World Bank.
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. La Asamblea General Adopta La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible.
- OCDE. (2012). *Crecimiento Verde Incluyente Para El Futuro Que Deseamos*.
- Ortega Acosta, A. I., Orozco Gutiérrez, C. J., González, C. P., Forero Díaz, D. A., Casas Camargo, H. L., Albarracín, J., Pérez Parra, L. F., Naranjo Velasco, S. O., & Montoya Villarreal, S. P. (2016). Bogotá D.C., hacia una nueva cultura en la gestión integral de los residuos de construcción y demolición. *Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)*. Bogotá, Colombia, 231. <https://ent.cat/wp-content/uploads/2016/03/Publicacion-Bogota-SDA.pdf>
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1995). *Economía de los recursos naturales y del medio ambiente* (p. 448). Colegio de Economistas de Madrid - Celeste Ediciones.
- Pérez, O. D., C. Fregoso, A. C., & H. Equihua, M. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 47–66.

- Prieto Sandoval, V., Jaca García, M., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, 15, 85–95.
- Res. SDA 1115. (2012). *Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital*.
- Robayo Salazar, R. A., Matthey Centeno, P. E., Silva Urrego, Y. F., Burgos Galindo, D. M., & Delvasto Arjona, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Revista Tecnura*, 19(44), 157. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>
- Sanmartín Ramón, G. S., Zhigüe Luna, R. A., & Alaña Castillo, T. P. (2017). El Reciclaje: Un nicho de innovación y emprendimiento con enfoque ambientalista. *Universidad y Sociedad*, 9(1), 36–40.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (n.d.). *MARCO JURÍDICO - NORMATIVIDAD AMBIENTAL*.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2014). *Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra*. 52.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2015). *Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en la Obra* (p. 45).
- Shiboub, I., & Assaf, G. J. (2019). A System Dynamic Model for Sustainable Construction and Demolition Waste Recycling in Libya. *European Scientific Journal ESJ*, 15(6). <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n6p191>
- System Dynamics Society. (2020). *Core System Dynamics Modeling Software*.
- Tascón Hoyos, D. C. (2017). *Modelo dinámico para contrastar el desempeño ambiental, social y económico de estrategias para la gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Bogotá D.C.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas.



- Wang, J. Y., & Yuan, H. P. (2009). Construction waste management model based on system dynamics. *Syst Eng Theor Pract*, 29(7), 173–180.
- Won, J., & Cheng, J. C. P. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in Construction*, 79, 3–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.002>
- Wu, H., Zuo, J., Yuan, H., Zillante, G., & Wang, J. (2019). A review of performance assessment methods for construction and demolition waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 150(July).  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104407>
- Yang, H., Xia, J., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2017). Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. *Waste Management*, 63, 393–396. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.026>

## 9 ANEXOS

**9.1 Anexo A. Base de datos Revisión Sistemática**

**9.2 Anexo B. Base de datos Modelo de Simulación Sostenible**

**9.3 Anexo C. Validación Grupo de Expertos**

<https://web.microsoftstream.com/video/e3dc9252-07ac-48cf-a7d7-b75c7511af51>

**9.4 Anexo D. Consentimiento informado**