



Modelando con dinámica de sistemas el problema insostenible de la gestión de residuos sólidos urbanos

Modeling with system dynamics the unsustainable problem of urban solid waste management

Eder Mauricio Acelas-Gómez¹, Javier Eduardo Arias-Osorio²

¹OPALO, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: xx. correo electrónico: eder2170328@correo.uis.edu.co

²OPALO, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: xx. correo electrónico: jearias@correo.uis.edu.co

Recibido: dd mes aaaa. Aceptado: dd mes aaaa. Versión final: dd mes aaaa

Resumen

La operación insostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (SGRSU) se origina en factores como el bajo compromiso ciudadano, la baja voluntad política y el erróneo diseño del sistema; todo ello permeado por una predominante comprensión reduccionista sobre el fenómeno. En un escenario así, surge la pregunta de cómo debería intervenir un SGRSU para operar sosteniblemente. Para dar respuesta a ello, se empleó la metodología de dinámica de sistemas para modelar y simular el fenómeno, aprovechando que esta permite reconocer la complejidad dinámica subyacente y que contribuye al mejoramiento de los modelos mentales de los individuos para fomentar su actuar en formas que maximicen los objetivos del sistema por sobre los suyos propios. El modelo se construyó haciendo referencia al contexto local colombiano, y a partir de la simulación se concluyó que la mejor manera de intervenir el problema es a través del máximo compromiso político y ciudadano, orientados a reducir la tasa de generación de residuos por habitante por año, pues se encontró que una reducción en la tasa de 500 gramos (1.39 gramos al día) lograría una disminución de 6.950 toneladas de la capacidad requerida. Esto no implica que se desmeriten las estrategias que buscan el aumento de la tasa de separación en la fuente, pues en el modelo esta no es viable por la relación de competencia modelada entre los recicladores y las personas prestadoras del servicio público de aseo dado el incentivo económico en disputa. Razón por la cual, y dado el alto componente social asociado al sistema, se recomienda solucionar primero el conflicto entre ambos actores para formular estrategias que aprovechen las sinergias de ambos, pues de una parte se garantizaría un aumento en la tasa de separación en la fuente, y con la otra, la total recolección de los residuos.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, simulación, sostenibilidad, residuos, gestión de residuos sólidos, gestión de residuos sólidos urbanos

Abstract

The unsustainable operation of an urban solid waste management system (USWMS) originates from factors such as low citizen commitment, low political will and the erroneous design of the system; all of this permeated by a predominant reductionist understanding of the phenomenon. In such a scenario, the question arises of how an USWMS should intervene to operate sustainably. To respond to this, the system dynamics methodology was used to model and simulate the phenomenon, taking advantage of the fact that it allows recognition of the underlying dynamic complexity and that contributes to the improvement of the mental models of individuals to encourage their actions in ways that maximize the system's objectives over their own. The model was built with reference to the local Colombian context, and from the simulation it was concluded that the best way to intervene in the problem is through maximum political and citizen commitment, aimed at reducing the rate of waste generation per inhabitant per year. It was found that a reduction in the rate of 500 grams (1.39 grams per day) would achieve a decrease of 6,950 tons of the required capacity. This does not imply that the strategies that seek to increase the separation rate at the source are detracted, since in the model this is not viable due to the competitive relationship modeled between the recyclers and the people providing the public cleaning service given the incentive economic dispute. For this reason, and given the high social component associated with the system, it is recommended to first resolve the conflict between both actors to formulate strategies that take advantage of the synergies of both, since on the one hand an increase in the separation rate at the source would be guaranteed, and with the other, the total collection of waste.

Keywords: System dynamics, simulation, sustainability, waste, solid waste management, urban solid waste management

1. Introducción

La operación insostenible de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos (SGRSU) es uno de los problemas más inmediatos que enfrentan los gobiernos de economías en desarrollo [1]; [2] pues ello contribuye al deterioro de la salud pública, la desigualdad económica, la injusticia ambiental, la desigualdad en la prestación del servicio de aseo [3] y la degradación del atractivo de los territorios [2]. Al analizar el fenómeno, es posible señalar como causas al bajo compromiso ciudadano, la baja voluntad política y el erróneo diseño del sistema, permeado todo ello por una predominante comprensión reduccionista sobre este, aspectos que naturalmente llevan a preguntarse cómo debería intervenir un SGRSU para operar sosteniblemente. Para dar respuesta a tal pregunta, este trabajo adopta la metodología de dinámica de sistemas pues esta reconoce y plasma la complejidad dinámica que presenta el fenómeno [4]; [2]; [5] además de ser pertinente para la búsqueda de una mejor comprensión sobre el mismo.

De hecho, así se observa en la literatura, en donde diferentes autores han avanzado en el modelado de características propias del sistema. En primer lugar, existen análisis que se centran en el aspecto operativo, por ejemplo, [1] quienes modelaron la influencia de la tasa de separación en la fuente en la eficiencia de los servicios de recolección y transporte de Bangkok, Tailandia, a través de la variación en la tasa, encontrando que a mayor sea esta, menor cantidad de residuos destinados a vertedero, menor costo de gestión y mayor eficiencia del servicio de recolección y transporte. Similarmente, [6] quienes se interesaron en modelar la

capacidad de las alternativas de tratamiento disponibles en Campania, Italia, evaluando cuatro escenarios en los que varían la tasa de separación objetivo y modifican la capacidad de los tratamientos existentes; encontrando que las políticas que conllevan al aumento de la tasa de recogida selectiva minimizan la capacidad requerida adicional del vertedero. Desde otra vertiente, [7] modelan la relación de las políticas económicas, demográficas, de clasificación y de tratamiento establecidas por el gobierno chino para la GRSU de Shanghai, a partir de lo cual evalúan siete escenarios en los que modifican y combinan parámetros asociados a las políticas, encontrando que la mayor reducción en la generación de residuos se obtiene al disminuir un 1% la tasa de crecimiento de la producción interna bruta. Asimismo, en el interés por predecir la operación del sistema, [8] simulan la cantidad de residuos generados, reciclados y vertidos en Lima, Perú; mientras que [9] -con un mayor alcance- predicen la operación del sistema con el ánimo de identificar retos económicos y alternativas políticas para implementar en Khulna, Bangladesh, señalando la importancia de aumentar el presupuesto para los sistemas de recolección y tratamiento en conjunto.

En cuanto a aspectos económicos, [10] orientan su modelo a demostrar el beneficio económico de la regionalización en la gestión de los residuos en Bogotá, Colombia, encontrando que la rentabilidad del sistema depende del número de suscriptores. Y, de manera más amplia, [11] se enfocan en plasmar la estructura de costos del sistema de Araraquara, Brasil, con el ánimo de contar con una herramienta para la planeación del sistema. Estos simulan seis escenarios en los que plasman expectativas de las partes interesadas alrededor de la tasa de

separación en la fuente, la implementación del compostaje y productividad en las cooperativas de reciclaje, encontrando que los ingresos por venta de materiales reciclables no cubren los gastos de operación, lo que hace al sistema dependiente de los subsidios gubernamentales. En efecto, los autores encontraron hallazgos similares en otros tres trabajos, lo que indica que el SGRSU no alcanza por sí mismo la sostenibilidad financiera pese a los diferentes medios para obtener ingresos.

Frente al aspecto social, este es abordado con énfasis en [12], quienes buscan conocer el efecto de la población recicladora en la vida útil del relleno sanitario de Santiago de Cali, Colombia, encontrando que la labor de los recicladores aumenta la vida útil del relleno en dos años. En la misma línea, [13] se interesan por modelar los beneficios del proceso de formalización del sector informal del reciclaje en el Área Metropolitana de Medellín, Colombia, confirmando que se genera una cantidad atractiva de ingresos y flujo de caja para el sistema, y que disminuye la cantidad de residuos reciclables que llegan al vertedero.

En última instancia, frente a aspectos ambientales [14] modelan la relación de la generación de residuos con la calidad ambiental, presentando esta como una función inversa de la cantidad de residuos y analizando que la disminución en la calidad siempre existirá por la acción de la población. Similarmente, [15], más allá de la mera generación, modelan la influencia de toda la GRSU en el índice de calidad ambiental urbana definido por la alcaldía de Bogotá, Colombia. Con un alcance mucho mayor, [16] analizan la factibilidad ambiental y económica de las opciones de tratamiento disponibles en el sureste de la cuenca del Lago Tai en China, haciendo uso del análisis del ciclo de vida. Los autores simulan siete escenarios en los cuales fijan distintas distribuciones porcentuales para los residuos a compostar, verter o incinerar, a partir de lo cual encuentran que las plantas de incineración permiten preservar la capacidad del vertedero por una década, emitir menos GEI, recuperar más energía y obtener beneficios económicos. Caso aparte, [17] se interesan por simular la emisión de gases de efecto invernadero a lo largo de la cadena de residuos en Kisumu, Kenia. Los autores simulan escenarios en los que suponen los efectos que tendrían la implementación de una iniciativa de conversión de residuos en biogás y una prohibición reglamentaria de la quema a cielo abierto de residuos en vertederos, encontrando que la combinación de estas dos intervenciones puede ahorrar más de 1,1 millones de toneladas de emisiones de GEI para 2035.

Habiendo analizado esto, el alcance de la investigación se centra en modelar y simular el problema de la operación insostenible en Floridablanca, Colombia, además de evaluar escenarios que permitan responder a

la pregunta de cómo debería intervenir el problema para lograr una operación sostenible, teniendo como hipótesis que la participación de los recicladores de oficio es un factor clave a considerar.

2. Metodología

Aprovechando que la metodología de dinámica de sistemas es un marco de trabajo flexible que varía de acuerdo con la experticia y creatividad del modelador, y con el propósito del modelo [18], en este trabajo se adapta junto con la metodología de complejidad creciente empleada por [19], la cual permite iniciar la representación del fenómeno en términos de los elementos fundamentales e ir ganando detalle y cobertura a medida que se incluyen, desagregan y clarifican las relaciones de más elementos.

La primera etapa consistió en conceptualizar el fenómeno, en donde se formuló una explicación sobre el mismo a partir de la información disponible empleando el diagrama de influencias. Luego, se procedió a definir los límites del problema a modelar y con base en esto, a formular el diagrama de flujo-nivel y a definir las ecuaciones correspondientes para su introducción al software Vensim PLE. A medida que se hacía esto, se corría el modelo y se observaba que los resultados fueran lógicos. Finalmente, se terminó con la variación de los valores de las variables palanca y con el análisis de los resultados que de ellos se obtenían, determinando así cual es la mejor forma de intervenir el problema.

3. Resultados

3.1. Conceptualización del fenómeno

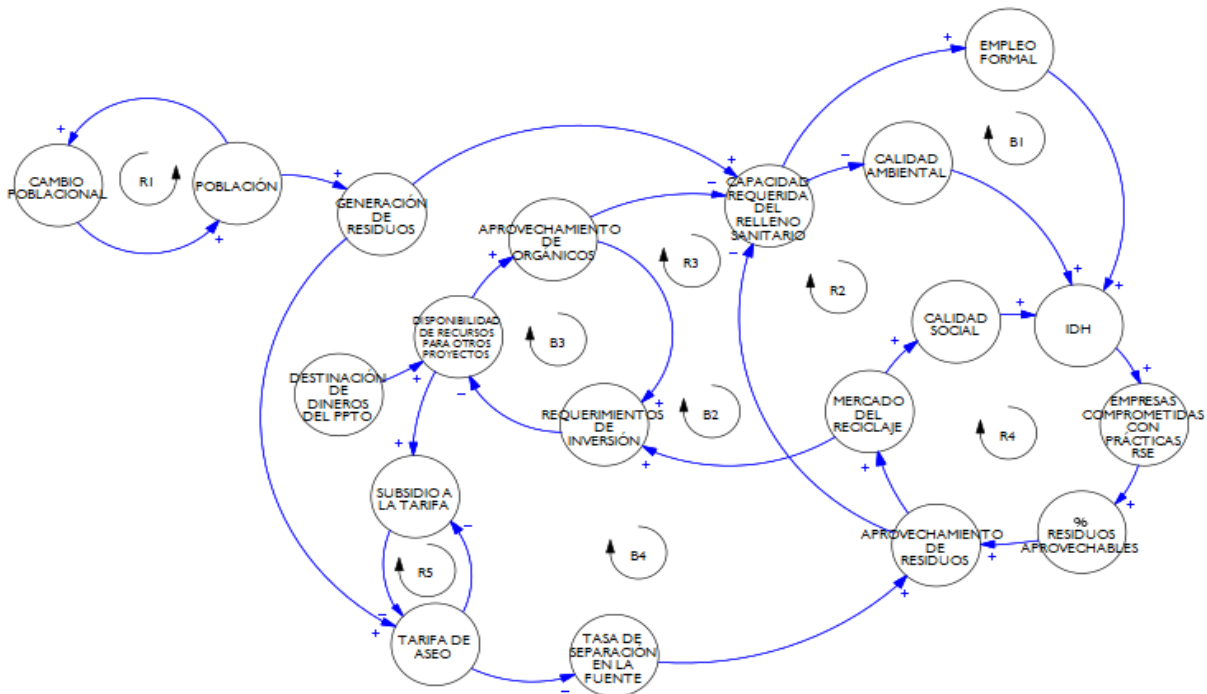


Figura 1: Diagrama de influencias para la conceptualización del fenómeno. Fuente: elaboración propia.

La conceptualización del fenómeno se presenta en la Figura 1. En ella se observan 19 variables y sus relaciones, las cuales conforman 4 ciclos de balance y 5 de refuerzo, los cuales se explican en la Tabla 1. Tal explicación contiene grandes supuestos. En primer lugar, se emula un contexto con alta cobertura de las necesidades básicas a través de la variable IDH, y se propone que una empresa con participación en tales contextos contará con fuertes iniciativas de RSE que la lleven a re concebir sus productos pensando en la gestión del residuo que se generará (esto es, aumentar el porcentaje de residuos que son categorizados como aprovechables). En segundo lugar, que los recursos de inversión son limitados y pueden ser usados para la consolidación del mercado de reciclaje, iniciar proyectos de aprovechamiento de orgánicos (teniendo en cuenta que este se genera en mayor porcentaje) y en subsidios a la tarifa de aseo. No obstante, estos recursos aumentarían si se asignan más recursos del presupuesto de la ciudad. En tercer lugar, que la tarifa de aseo se comporta como un incentivo económico para que la población adopte prácticas de separación en la fuente que lleven a aumentar esta tasa, proponiéndose que a mayores valores en la tarifa, menores tasas de separación se registrarán. Finalmente, que el aumento en la capacidad requerida del relleno sanitario es el escenario prevaeciente y que ello garantiza la continuidad de beneficios económicos para un sector del sistema a cambio de la generación de empleo formal.

3.2. Límites del problema de interés

En la Figura 2 se acota el problema de interés dejando a un lado la consideración de que el SGRSU es interdependiente de los sistemas natural, industrial, social y político, pues ello implicaría un modelo matemático extenso y un arduo trabajo en la búsqueda de datos y en la elaboración de ecuaciones y supuestos.

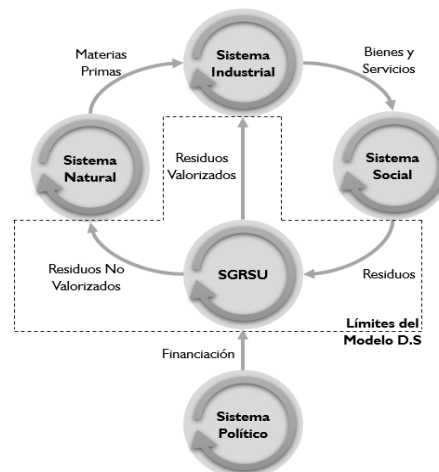


Figura 2: Limitación del fenómeno al problema de interés. Fuente: elaboración propia.

Bucle	Prosa
B1	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, mayor será la población empleada en esta labor, ello aumenta el IDH, lo que hace que aumenten las posibilidades de las empresas para comprometerse con prácticas RSE, lo que hará que se produzcan más residuos de categoría aprovechable y por ende se aumente el aprovechamiento, lo que a su vez disminuiría la capacidad del relleno sanitario y con ello disminuye la necesidad de emplear población para esta labor.
B2	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, menor será la calidad ambiental, menor será el IDH, menor serán las posibilidades de las empresas para comprometerse con iniciativas RSE, por ende, menor será la cantidad de residuos categorizados como aprovechables, lo que limita la cantidad de aprovechamiento, limitando también la consolidación del mercado de reciclaje, implicando un menor requerimiento de inversión, haciendo que hayan más recursos disponibles para otros proyectos, potenciándose el aprovechamiento de orgánicos, lo que disminuye la capacidad requerida del relleno sanitario y genera una mejora en la calidad ambiental
B3	A mayor aprovechamiento de orgánicos, más requerimientos de inversión, menor disponibilidad de recursos, por ende menos aprovechamiento de orgánicos.
B4	A mayor disponibilidad de recursos, mayor subsidio a la tarifa, menor valor de la tarifa de aseo, más tasa de separación en la fuente, más aprovechamiento de residuos, mayor consolidación del mercado del reciclaje, mayores requerimientos de inversión para el sector, menor disponibilidad de recursos, por ende menor subsidio a la tarifa.
R1	A mayor población mayor será el cambio poblacional, y a mayor cambio poblacional mayor será la población
R2	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, menor será la calidad ambiental, menor será el IDH, menor serán las posibilidades de las empresas para comprometerse con iniciativas RSE, por ende, menor será la cantidad de residuos categorizados como aprovechables, lo que limita la cantidad de aprovechamiento y ello hace que se demande más capacidad del relleno sanitario.
R3	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, mayor será la población empleada, ello aumenta el IDH, lo que hace que aumenten las posibilidades de las empresas para comprometerse con prácticas RSE, lo que hará que se produzcan más residuos de categoría aprovechable y por ende se aumente el aprovechamiento, consolidándose el mercado del reciclaje, y demandando más inversión para el sector, lo que implica menor disponibilidad de recursos para otros proyectos, es decir, menor aprovechamiento de orgánicos, y por ende mayor capacidad requerida del relleno sanitario.
R4	A mayor calidad social, mayor IDH, más probabilidades de que las empresas se comprometan con prácticas RSE, mayor porcentaje de residuos aprovechables, mayor aprovechamiento de residuos, mayor mercado del reciclaje, mayor calidad social, que deriva en mayor IDH.
R5	A mayor subsidio a la tarifa, menor tarifa de aseo y a menor tarifa más subsidio a la tarifa se hace necesario.

Tabla 1: Explicación del diagrama de influencias. Fuente: elaboración propia.

3.3. Diagrama de flujo nivel

A partir de la limitación del fenómeno al problema de interés, el modelo dinámico-sistémico se construye con 3 variables de nivel, 5 variables de flujo, 9 variables auxiliares exógenas y 3 variables auxiliares endógenas; de entre las cuales se definen 5 variables palanca y 3 medidas de desempeño, tal y como se muestra en la Figura 3.

En primer lugar, la generación de residuos se calcula a partir de la tasa de generación de residuos por habitante y el número de habitantes. *La tasa de generación* se asume como constante para el periodo de simulación y se le asigna el valor de 0.2475 ton/hab/año, el cual se recalcula a partir de las tasas de generación diarias calculadas por el PGIRS de Floridablanca (2015). El

número de habitantes (*población*) se modela en el tiempo tomando como base el dato de población inicial (año 2000) y la *tasa de cambio poblacional*. A esta última se le asigna el valor de 0.0146 / año, la cual corresponde al promedio de las tasas de cambio calculadas entre los valores de población de cada año presentadas por el DANE para el periodo 2000-2035 a partir del censo del 2018.

La validación de los resultados se realiza calculando el *error relativo promedio* como $\overline{E}_R = \frac{\sum_i^n \left(\frac{|T_i - A_i|}{T_i} \right)}{n}$, donde T_i es el valor teórico en el instante i (modo de referencia); A_i es el valor aproximado obtenido del modelo en el instante i ; y n es el total de observaciones i , es decir, la cantidad de datos disponibles. Para la variable *generación de residuos*, se validan los resultados

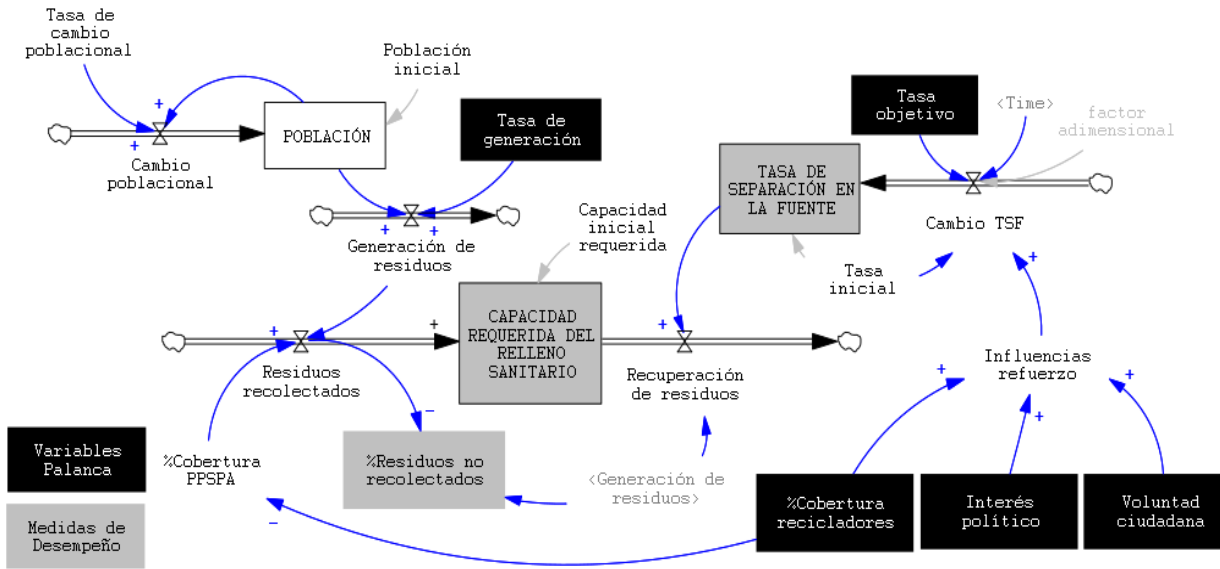


Figura 3: Modelo dinámico-sistémico del problema de interés. Fuente: elaboración propia.

tomando como base la serie de generación de residuos presentados por el PGIRS Floridablanca (2015), cuyo comparativo se presenta en la Figura 4. El \bar{E}_R obtenido es de 3.1%, pudiéndose validar que el modelo representa de manera aceptable el comportamiento conocido de la variable generación de residuos.

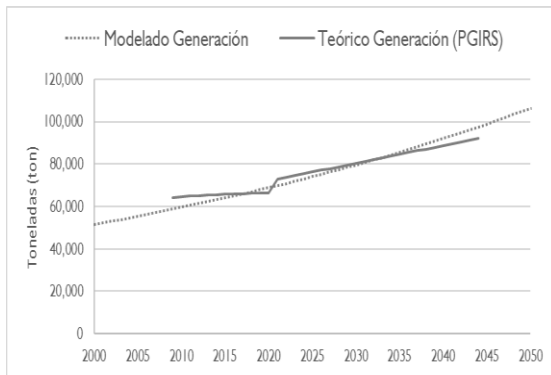


Figura 4: Validación de la variable generación de residuos. Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, la variable *población* se valida a partir de los datos presentados por el DANE (Figura 5), obteniéndose un \bar{E}_R de 5.08% y pudiéndose validar que el modelo representa de manera aceptable el comportamiento conocido de la variable población.

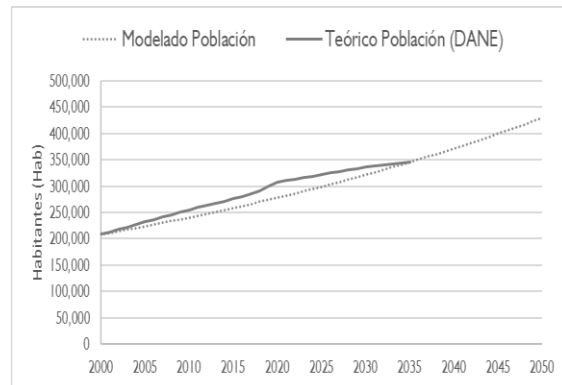


Figura 5: Validación de la variable población. Fuente: elaboración propia.

En segundo lugar, se aborda la dinámica alrededor de la capacidad requerida del relleno sanitario en función de los residuos recolectados y la recuperación de estos. Los residuos recolectados están en función de la cobertura de las PPSPA, es decir, del alcance en la prestación del servicio que permite recolectar parte o la totalidad de los residuos generados. Al ser recolectados los residuos por las PPSPA, estos tienen como destino la disposición final, que en el contexto local es el relleno sanitario; de modo que, a mayor cantidad de residuos recolectados mayor será la *capacidad requerida del relleno sanitario*. En contraparte, la requisición de capacidad se puede amortiguar al evitarse que todos los residuos sigan este flujo, esto es, al separarse en la fuente parte de los

residuos generados lo cual habilita una posterior *recuperación* y valorización. Para el modelo, el valor de la tasa de separación en la fuente se asume como 2.1% y es extraído del estudio realizado por CEMPRE (2019) para el municipio. Adicionalmente, en el modelo se intenta reflejar la presencia de los recicladores de oficio, y se establece una relación inversa con las PPSPA del tipo $\%Cobertura\ PPSPA = 1 - \%Cobertura\ Recicladores$, intentando reflejar la situación competitiva en la que estos se encuentran por el manejo de los residuos, y haciendo de esta una variable independiente con la cual analizar diferentes escenarios. Además, el modelo monitorea el *porcentaje de residuos no recolectados* pues esto presupone una inadecuada disposición de estos o, en otras palabras, el aumento en el porcentaje de residuos que son dispuestos en botaderos ilegales, lo cual impacta de igual o peor manera que el aumento en la capacidad requerida del relleno sanitario.

A priori, el comportamiento cualitativo de estas variables se presenta en la Figura 6.

En ella se observa el crecimiento continuo de la capacidad requerida del relleno sanitario como resultado de la creciente recolección de residuos. A su vez, se observa que la recolección de residuos es inferior a la generación de residuos, lo que implica que el porcentaje de cobertura de las PPSPA es inferior al 100% a causa de la participación de los recicladores de oficio. Por último, frente a la recuperación de residuos se observa que es una cantidad pequeña de los residuos generados, que corresponde al hecho de que la tasa de separación en la fuente es del 2.1%.

Por último, si bien hasta el momento se ha definido la tasa de separación en la fuente como una constante de valor 2.1%, resulta interesante reflejar en el modelo que esta tasa es en realidad variable al ser objeto de políticas que buscan su aumento. En razón a esto, se representa su dinámica impulsada por la definición de un objetivo (tasa objetivo) e influenciada por las variables cualitativas *voluntad ciudadana*, el *interés político* y el *porcentaje de cobertura de los recicladores*.

Se considera que al graficar la tasa de separación en la fuente esta debería seguir un comportamiento como el de una función logística $f(t) = \frac{L}{1+e^{-k(t-t_0)}}$, pues así se reflejaría (i) el estado inicial estacionario, en donde la tasa no aumenta significativamente y los esfuerzos para difundir la importancia de la separación son vanos; (ii) un estado intermedio, con un creciente aumento en la tasa, indicando que el mensaje empieza a ser aceptado y difundido por la misma sociedad; y (iii) un estado final, en donde la tasa se estancaría en un punto proporcional a la tasa objetivo definida y a los recursos invertidos en su consecución.

Ahora bien, teniendo en cuenta que en la función $f(t)$, L es el límite superior o capacidad máxima de adopción, k es la tasa de crecimiento de la adopción y t_0 es el punto medio que representa el tiempo de la adopción más rápida; se define la función teniendo en cuenta que en la política pública se tiene como meta a 2030 alcanzar una tasa de aprovechamiento del 17.9%. Así, se define $f(t) = \frac{T.O - T.I}{1+e^{-k(t-t_0)}} + T.I$, donde $T.O$ es la tasa objetivo de 17.9%, $T.I$ es la tasa inicial de 2.1%, k se establece

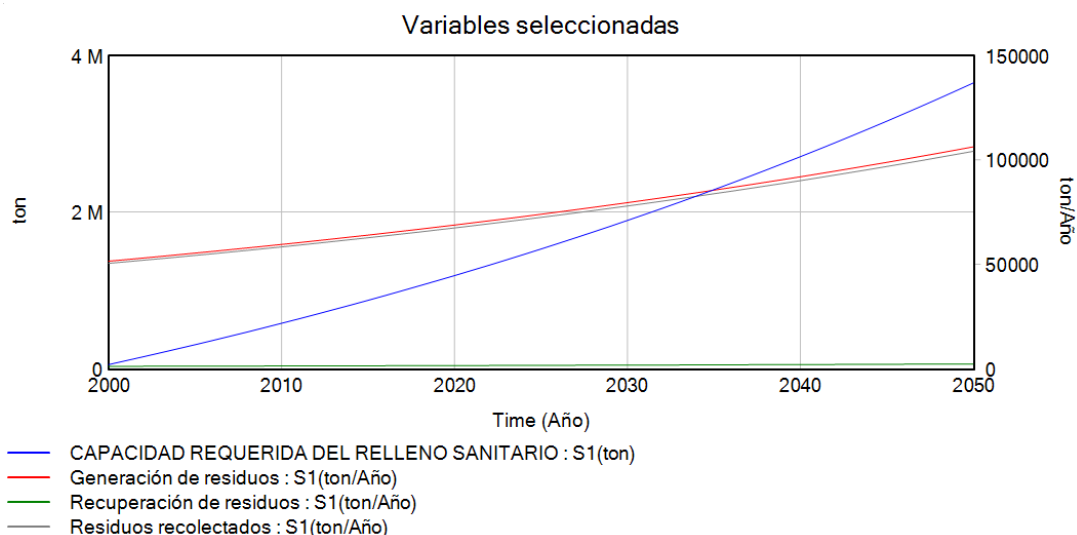


Figura 6: Comportamiento cualitativo de las variables asociadas a la capacidad requerida del relleno sanitario.

Fuente: elaboración propia.

como 1 (al no contar con datos para su cálculo) y t_0 como 2027, al ser un punto medio entre 2024 y 2030. De este modo, se obtiene la ecuación $f(t) = \frac{0.158}{1+e^{-(t-2027)}} + 0.021$, cuya forma es la presentada en la Figura 7.

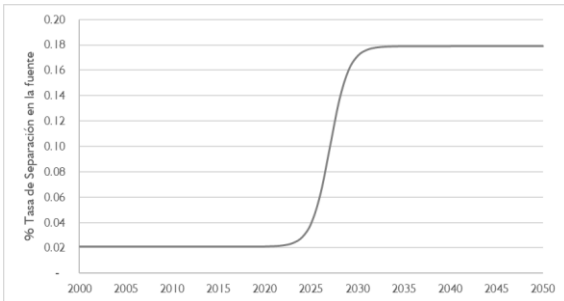


Figura 7: Función de la tasa de separación en la fuente. Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, dado que en el modelo (Figura 3) el comportamiento de la Figura 7 debe surgir por la influencia de la variable de cambio en la tasa de separación en la fuente (cambio TSF), se hace necesario calcularla haciendo uso de la primera derivada de la función $f(t)$, la cual es $f'(t) = \frac{0.158e^{-t+2027}}{(e^{-t+2027}+1)^2}$, cuya forma se presenta en la Figura 8.

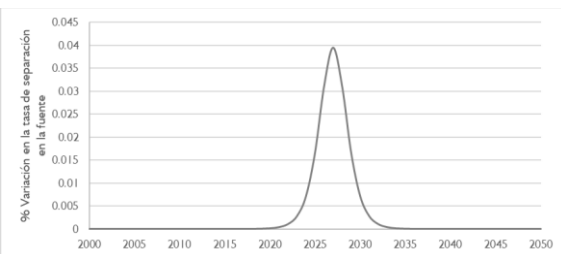


Figura 8: Derivada de la función tasa de separación en la fuente. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, esta ecuación se modula con la variable *influencias de refuerzo*, que resulta de ponderar la presencia de las variables *interés político*, *voluntad ciudadana* y *porcentaje de cobertura de los recicladores*, las cuales toman valores de 0 a 1. La variable *interés político* se pondera como 5/12, reflejando la importancia de este actor y su influencia en la obtención de resultados favorables en el sistema [20]; [21];[22]. Un valor de 0 en esta variable indicaría la total apatía del actor a intervenir el sistema, mientras que un valor de 1 el compromiso total a soportarlo. La variable *voluntad ciudadana* se pondera como 4/12 indicando que es un actor igualmente importante y que de su adopción de las iniciativas depende que el sistema mejore. Un valor de 0 indicaría a

apatía total, mientras que 1 el compromiso total a contribuir y participar de las intervenciones propuestas. Finalmente, la variable *porcentaje de cobertura de los recicladores* se pondera como 3/12 y refleja la existencia de los recicladores de oficio en el sistema y la relevancia que estos tienen como impulsores de la separación en la fuente, recuperadores de materiales y habilitadores del flujo de valorización de residuos. Un valor de 0 indicaría el no reconocimiento de estos y por ende su desconexión con el sistema, mientras que 1 el convertirlos en el foco central de la prestación del servicio público de aseo.

A priori, el comportamiento cualitativo de estas variables se presenta en la Figura 9. En ella se tiene un interés político y voluntad ciudadana de 1, y un porcentaje de cobertura de los recicladores de 2%, lo que arroja un valor de influencias de refuerzo del 0.755; siendo esta la razón por la cual la tasa de separación en la fuente no alcanza el valor de la tasa objetivo al final del periodo de simulación.

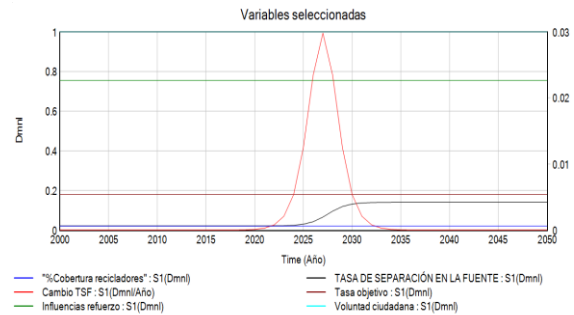


Figura 9: Derivada de la función tasa de separación

3.4. Ecuaciones

Para mayor facilidad en el entendimiento de la matemática detrás del modelo, en la Tabla 7 al final del artículo se presentan las ecuaciones empleadas.

3.5. Análisis de escenarios

Para la evaluación de escenarios se tienen en cuenta las variables palanca y medidas de desempeño presentadas en la Figura 3. Si bien las medidas de desempeño no hacen alusión directa a temas de sostenibilidad, en su conjunto e interpretación se encuentra el sentido de orientación hacia una operación sostenible.

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S0	0.2475	0	0	0	0	0	3,728,340	2.10%

Tabla 2: Escenario de participación nula. Fuente: elaboración propia.

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S1	0.2475	0	0	0	1	0%	3,742,250	1.40%
S2	0.2475	0.179	0	1	0	0%	3,597,510	8.60%
S3	0.2475	0	1	0	0	100%	-16,909	1.50%

Tabla 3: Escenarios de participación individual. Fuente: elaboración propia.

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S12	0.2475	0.179	0	1	1	0%	3,492,850	13.95%
S13	0.2475	-	1	0	1	100%	-2,999	0.80%
S23	0.2475	0.179	1	1	0	100%	-236,662	12.60%
S123	0.2475	0.179	1	1	1	100%	-341,322	17.90%

Tabla 4: Escenarios de participación conjunta. Fuente: elaboración propia.

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S12	0.2475	17.9%	0	1	1	0%	3,492,850	13.95%
S12'	0.2475	17.9%	1%	1	1	1.0%	3,454,510	13.98%
S12''	0.2475	17.9%	10%	1	1	10.0%	3,109,430	14.34%

Tabla 5: Análisis de sensibilidad al mejor escenario con la variable % Cobertura recicladores. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, en la Tabla 2 se analiza el escenario nulo. En este, las variables palanca¹ toman valor cero (a excepción de la tasa de generación, pues de asignarle a esta cero el modelo reflejaría el irreal estado de nula generación de residuos) y se obtiene una capacidad requerida del relleno sanitario de 3'728.340 ton y una tasa de separación en la fuente de 2.1%.

Ahora bien, en la Tabla 3 se analizan los escenarios en los que se plasma la participación de uno solo de los tres actores representados, es decir, una influencia toma valor 1 y los otros dos valores 0.

Se observa que el escenario más sostenible se obtiene al contar con el interés político pues se logra una tasa de separación en la fuente de 8.6% con la consecuente disminución de la demanda de capacidad del relleno. Por otra parte, el escenario más insostenible se obtiene al tener una cobertura total por parte de los recicladores, pues esto implica que el porcentaje de residuos no recolectados sea del 100%, dado que estarían desplazando a las PPSPA.

Continuando el análisis, en la Tabla 4 se presentan escenarios en los que los actores actúan en conjunto. Si bien con el escenario S123 se obtiene la tasa de separación la máxima (17.9%), esto implica que el porcentaje de residuos no recolectados también lo sea (100%). En razón a esto, el escenario más sostenible corresponde al S12, en donde la presencia del interés

político y la voluntad ciudadana logran una tasa de separación en la fuente del 13.95%. Asimismo, se consolida la idea de que asignar una cobertura total a los recicladores es insostenible.

A partir de lo anterior, en la Tabla 5 se intenta mejorar los resultados del escenario S12 a partir del incremento parcial en el porcentaje de cobertura de los recicladores.

Como se puede observar, al aumentar la cobertura al 1% se obtiene el mismo aumento en el porcentaje de residuos no recolectados, pero tan solo un aumento de 0.03% en la tasa de separación en la fuente. De igual manera, al aumentar la cobertura en un 10% la tasa de separación solo aumenta 0.39% pero el porcentaje de residuos no recolectados aumenta al mismo 10%. Si bien lo anterior se debe a la ponderación definida para estas tres variables influyentes, el escenario S12 continúa siendo el más sostenible.

Ahora bien, con relación a la variable tasa de generación, es claro que al ser esta una de las primeras variables dinamizadores del modelo (luego de la tasa de cambio poblacional) al disminuirse se reflejaría directamente en una menor capacidad requerida del relleno sanitario y por ende en un comportamiento más sostenible del sistema. De acuerdo con la Tabla 6, una disminución de 100 gramos en la generación de residuos al año (0.274 gramos al día) implicaría una disminución de 1.390 toneladas en la capacidad requerida del relleno sanitario a 2050, y una

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
INICIAL	0.2475	17.9%	0	1	1	0%	3,492,850	13.95%
-100 gr	0.2474	17.9%	0	1	1	0%	3,491,460	13.95%
-200 gr	0.2473	17.9%	0	1	1	0%	3,490,070	13.95%
-300 gr	0.2472	17.9%	0	1	1	0%	3,488,680	13.95%
-400 gr	0.2471	17.9%	0	1	1	0%	3,487,290	13.95%
-500 gr	0.247	17.9%	0	1	1	0%	3,485,900	13.95%

Tabla 6: Análisis de sensibilidad al mejor escenario con la variable Tasa de generación. Fuente: elaboración propia.

¹ La variable palanca Tasa de generación varía únicamente en el análisis de la Tabla 6, asumiéndose como constante en los análisis de las demás tablas.

diminución de 500 gramos (1.39 gramos al día), una disminución de 6.950 toneladas en la capacidad requerida.

4. Conclusiones

A partir de la evaluación de escenarios, se concluye que la mejor manera de intervenir el problema de la operación insostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos es a través del máximo compromiso político y ciudadano, pero orientados a reducir la tasa de generación de residuos por persona al año. En la Tabla 6 se observó que tal compromiso junto con una reducción de 500 gramos al año en la generación de residuos (1.39 gramos al día) representa el alcanzar una disminución de 6.950 toneladas en el requerimiento de la capacidad del relleno sanitario a 2050 (frente al escenario inicial).

Lo anterior no pretende desacreditar la importancia de las estrategias orientadas al incremento de la tasa de separación en la fuente, lo que sucede es que, tal y como se interpretó el sistema real, se limitó y se modeló el problema con dinámica de sistemas, la tasa de separación en la fuente está ligada a la operación de los recicladores de oficio y la operación de estos genera conflicto con la operación de las personas prestadoras del servicio público de aseo o, en otras palabras, del sector tradicional. Tal conflicto, dentro del análisis, buscó evitarse anulando la participación de los recicladores y garantizando así la recolección de los residuos y evitando la creación de botaderos ilegales, lo cual tendría un impacto peor (y más visible) comparado con el aumento en la capacidad requerida del relleno sanitario.

No obstante, entendiendo el fuerte componente social que se interrelaciona al sistema en estudio, el mejor curso de acción sería resolver primeramente el conflicto de intereses entre ambos actores y luego formular estrategias que permitan aprovechar las sinergias que se derivan de contar con una alta cobertura de los recicladores de oficio (pues ello incrementa la tasa de separación en la fuente como se vio en la Tabla 5), contar con una alta cobertura del sector tradicional (pues ello garantiza la recolección de los residuos como se vio en la Tabla 3 y 4) y trabajar en la reducción de la tasa de generación de residuos (cuyos beneficios se explican en la Tabla 6).

5. Recomendaciones

Modelar otro tipo de relaciones entre los porcentajes de cobertura de las PPSPA y los recicladores, los cuales estén orientados a superar la competencia entre estos y a

garantizar que ambos obtengan beneficios económicos derivados del tipo y la cantidad de residuos que recolectan y transportan.

Incorporar al modelo variables asociadas a los indicadores de desarrollo sostenible presentados en el CONPES 3918 de 2018, cuyas mediciones (parcialmente) se encuentran publicadas por el DANE.

6. Referencias

- [1] P. Sukholthaman and A. Sharp, “A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand,” vol. 52, pp. 50–61, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.026.
- [2] H. Breukelman, H. R. Krikke, and A. J. Löhr, “Failing services on urban waste management in developing countries: A review on symptoms, diagnoses, and interventions,” vol. 11, no. 24, Dec. 2019, doi: 10.3390/sul11246977.
- [3] J. Ma and K. W. Hipel, “Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe – A systematic literature review,” vol. 56, pp. 3–12, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.041.
- [4] N.-B. Chang, A. Pires, and G. Martinho, “Empowering Systems Analysis for Solid Waste Management: Challenges, Trends, and Perspectives,” vol. 41, no. 16, pp. 1449–1530, Jan. 2011, doi: 10.1080/10643381003608326.
- [5] L. do N. Sancheta, G. de L. D. Chaves, and R. R. Siman, “The use of system dynamics on urban solid waste management: a literature analysis,” vol. 28, no. 3, 2021, doi: 10.1590/1806-9649-2021v28e5336.
- [6] M. F. Di Nola, M. Escapa, and J. P. Ansah, “Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy,” vol. 78, pp. 717–729, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.06.006.
- [7] S. Xiao, H. Dong, Y. Geng, X. Tian, C. Liu, and H. Li, “Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis,” vol. 262, p. 121366, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121366.
- [8] M. G. Retuerto, D. Y. Espinoza, and L. Andrade-Arenas, “System Dynamics Modeling for Solid Waste Management in Lima Peru,” vol. 12, no. 7, 2021, doi: 10.14569/IJACSA.2021.0120762.

- [9] S. M. Rafew and I. M. Rafizul, "Application of system dynamics model for municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh," vol. 129, pp. 1–19, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.04.059.
- [10] D. Ibarra, J. Redondo, and C. Peña, "Modelo de regionalización para el manejo sostenible de los residuos sólidos municipales ." 8o Congreso Latinoamericano y 8o Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, 2010, 2010.
- [11] A. C. H. Pinha and J. K. Sagawa, "A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis," vol. 269, p. 122350, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122350.
- [12] A. V. Hernández and J. D. Grajales, "Estudio sobre el aprovechamiento realizado por los recicladores en la vida útil de un relleno sanitario." XII Encuentro colombiano de Dinámica de Sistemas, 2014.
- [13] S. L. P. Vélez and N. E. Mora, "System dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia," vol. 18, no. 2, pp. 161–180, 2016, doi: 10.1504/IJEW.2016.080404.
- [14] J. Solano and R. Johan, "Dinámica de sistemas aplicada a la triada: población, generación de residuos y calidad ambiental." 8o Congreso Latinoamericano y 8o Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, 2010, 2010.
- [15] J. Rodríguez and D. Ibarra-Vega, "Gestión de residuos y su influencia en el índice de calidad ambiental urbana en Bogotá." XV ENCUESTRO COLOMBIANO DE DINÁMICA DE SISTEMAS, 2017.
- [16] D. Lu, A. Iqbal, F. Zan, X. Liu, and G. Chen, "Life-Cycle-Based Greenhouse Gas, Energy, and Economic Analysis of Municipal Solid Waste Management Using System Dynamics Model," vol. 13, no. 4, p. 1641, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13041641.
- [17] K. Dianati et al., "A system dynamics-based scenario analysis of residential solid waste management in Kisumu, Kenya," vol. 777, p. 146200, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146200.
- [18] J. Sterman, *Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [19] H. Andrade, I. Dyner, A. Espinosa, H. López, and R. Sotaquirá, *Pensamiento sistémico: Diversidad en búsqueda de unidad*. Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001, pp. 169–253.
- [20] A. A. Babaei, N. Alavi, G. Goudarzi, P. Teymouri, K. Ahmadi, and M. Rafiee, "Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management," vol. 102, pp. 94–100, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.06.014.
- [21] L. Rodić and D. Wilson, "Resolving Governance Issues to Achieve Priority Sustainable Development Goals Related to Solid Waste Management in Developing Countries," vol. 9, no. 3, p. 404, Mar. 2017, doi: 10.3390/su9030404.
- [22] A. M. Niño Torres, J. M. Trujillo Gonzalez, and A. P. Niño Torres, "Gestión de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Villavicencio. Una mirada desde los grupos de interés: empresa, estado y comunidad," no. 44, pp. 177–187, Jan. 2017, doi: 10.17151/luaz.2017.44.11.

Ecuación	Fórmula	Unidades	Descripción
(01)	"%Cobertura PPSPA" = 1 - "%Cobertura recicladores"	Dmnl	Variable dependiente que refleja la relación competitiva entre los recicladores y las PPSPA por el manejo de los residuos
(02)	"%Cobertura recicladores" = 0.02	Dmnl	Un valor de 0 indicaría el no reconocimiento de estos y por ende su desconexión con el sistema, mientras que 1 el convertirlos en el foco central de la prestación del servicio público de aseo.
(03)	"%Residuos no recolectados" = (Generación de residuos - Residuos recolectados) / Generación de residuos	Dmnl	-
(04)	Cambio poblacional = POBLACIÓN * Tasa de cambio poblacional	hab/Año	-
(05)	Cambio TSF = (Tasa objetivo - Tasa inicial) * Influencias refuerzo / factor adimensional * EXP(2027 - Time / factor adimensional) / (EXP(2027 - Time / factor adimensional) + 1)^2	Dmnl/Año	La ecuación corresponde a la primera derivada de la función logística
(06)	Capacidad inicial requerida = 51527	ton	Valor inicial calculado con la tasa de generación y el valor inicial de la población.
(07)	CAPACIDAD REQUERIDA DEL RELLENO SANITARIO = INTEG (Residuos recolectados - Recuperación de residuos, Capacidad inicial requerida)	ton	-
(08)	factor adimensional = 1	Año	Permite superar el error en las unidades al hacer cálculos con variables de tiempo
(09)	FINAL TIME = 2050	Año	El período final de la simulación.
(10)	Generación de residuos = POBLACIÓN * Tasa de generación	ton/Año	
(11)	Influencias refuerzo = 5/12 * Interés político + 4/12 * Voluntad ciudadana + 3/12 * "%Cobertura recicladores"	Dmnl	Ponderación de las tres variables palanca. Los pesos asignados son a criterio del modelador.
(12)	INITIAL TIME = 2000	Año	El período inicial de la simulación.
(13)	Interés político = 1	Dmnl	Un valor de 0 en esta variable indicaría la total apatía del actor a intervenir el sistema, mientras que un valor de 1 el compromiso total a soportarlo
(14)	POBLACIÓN = INTEG (Cambio poblacional, Población inicial)	hab	
(15)	Población inicial = 208190	hab	El valor de la población inicial corresponde al calculado por el DANE para el año 2000
(16)	Recuperación de residuos = Generación de residuos * TASA DE SEPARACIÓN EN LA FUENTE	ton/Año	Se asume que todos los residuos que se separan en la fuente son valorizados.
(17)	Residuos recolectados = Generación de residuos * "%Cobertura PPSPA"	ton/Año	Se asume que la cobertura de las PPSPA determina la cantidad de residuos recolectados
(18)	SAVEPER = TIME STEP	Año [0,?]	La frecuencia con la que se almacena la salida
(19)	Tasa de cambio poblacional = 0.0146	1/Año	Calculado a partir de datos publicados por el DANE.
(20)	Tasa de generación = 0.2472	ton/Año/hab	Dato presentado en el PGIRS Floridablanca (2015). Se asume como constante para todo el periodo de simulación.
(21)	TASA DE SEPARACIÓN EN LA FUENTE = INTEG (Cambio TSF, Tasa inicial)	Dmnl	Se garantiza la forma de la función logística definiendo la variable "Cambio TSF" como la primera derivada de la función
(22)	Tasa inicial = 0.021	Dmnl	Valor presentado por CEMPRE (2019) para el municipio de Floridablanca
(23)	Tasa objetivo = 0.179	Dmnl	Valor establecido en el CONPES 3918 del 2018
(24)	TIME STEP = 1	Año [0,?]	The time step for the simulation.
(25)	Voluntad ciudadana = 1	Dmnl	Un valor de 0 indicaría a apatía total, mientras que 1 el compromiso total a contribuir y participar de las intervenciones propuestas

Tabla 7: Ecuaciones empleadas en el modelo.