



**RCS**

**Depósito legal ppi 201502ZU4662**

Esta publicación científica en formato  
digital es continuidad de la revista impresa  
Depósito Legal: pp 197402ZU789  
ISSN: 1315-9518

Universidad del Zulia. Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales  
**Vol. XXVI.**

**Número 4, 2020**

# Revista de Ciencias Sociales



Esta publicación científica en formato  
digital es continuidad de la revista impresa  
Depósito Legal: pp 197402ZU789  
ISSN: 1315-9518

# Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo – Ecuador

**Alcocer Quinteros, Patricio\***  
**Knudsen González, José\*\***  
**Marrero Delgado, Fernando\*\*\***  
**Miranda Casanova, Betsy\*\*\*\***

## Resumen

El análisis de la cadena de suministros de residuos sólidos urbanos permite revelar los principales problemas que la afectan. Este trabajo presenta un modelo multicriterio para la optimización de las variables económicas, impacto ambiental y satisfacción al cliente del proceso de gestión integral de los residuos sólidos urbanos, el cual facilita que se promuevan acciones de mejora sistemática de variables o factores que intervienen en el proceso. El modelo permite generar información para la toma de decisiones por parte de autoridades municipales, en el cantón de Quevedo-Ecuador. Para lograrlo, se procedió a hacer un diagnóstico de las condiciones actuales del proceso de generación, transporte, separación, tratamiento, compostaje y disposición final de éstos residuos, identificando los indicadores pertinentes para la gestión actual del mismo y posteriormente se elaboró el modelo multicriterio incluyendo cuatro funciones objetivas cuya meta es la optimización del problema, considerando una serie de restricciones en cada uno de los procesos mencionados anteriormente. El resultado obtenido permite minimizar el costo y uso de transporte, maximizar el ahorro

---

\* Profesor en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. E-mail: [palcocer@uteq.edu.ec](mailto:palcocer@uteq.edu.ec)  ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-5529>

\*\* Profesor en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba. E-mail: [knudsen@uclv.edu.cu](mailto:knudsen@uclv.edu.cu)  ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5079-138X>

\*\*\* Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero. Profesor en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba. E-mail: [fmarrero@uclv.edu.cu](mailto:fmarrero@uclv.edu.cu)  ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5470-2572>

\*\*\*\* Investigadora particular en Quevedo, Ecuador. E-mail: [arianalcocer@hotmail.com](mailto:arianalcocer@hotmail.com)  ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9681-9536>

del impacto ambiental y la satisfacción al cliente. Se concluye, que la aplicación del modelo multicriterio permitió constatar su factibilidad y racional utilización como instrumento efectivo del proceso de toma de decisiones.

**Palabras clave:** Modelo multicriterio; sostenibilidad; gestión integral de residuos; residuos sólidos urbanos; Quevedo-Ecuador.

## *Multicriteria model for the integral management of urban solid waste in Quevedo - Ecuador*

### **Abstract**

The analysis of the urban solid waste supply chain reveals the main problems that affect it. This work presents a multi-criteria model for the optimization of the economic variables, environmental impact and customer satisfaction of the integral management process of urban solid waste, which facilitates the promotion of systematic improvement actions of variables or factors that intervene in the process. The model allows generating information for decision-making by municipal authorities in the canton of Quevedo-Ecuador. To achieve this, a diagnosis was made of the current conditions of the generation, transport, separation, treatment, composting and final disposal process of these wastes, identifying the relevant indicators for the current management of the same and later the multi-criteria model was elaborated including four objective functions whose goal is the optimization of the problem, considering a series of restrictions in each of the processes mentioned above. The result obtained allows minimizing the cost and use of transportation, maximizing savings in environmental impact and customer satisfaction. It is concluded that the application of the multi-criteria model allowed to verify its feasibility and rational use as an effective instrument of the decision-making process

**Keywords:** Multicriteria model; sustainability; comprehensive waste management; solid urban waste; Quevedo-Ecuador.

### **Introducción**

La recolección de residuos sólidos domiciliarios, comerciales e industriales mezclados en una zona urbana es una tarea difícil y compleja, puesto que éstos tienen múltiples formas de generarse y cada actividad humana es un punto de generación, ya sean las propiedades privadas, los espacios públicos e incluso las zonas deshabitadas. Los residuos sólidos urbanos (RSU) generados por los grupos humanos siempre existieron, la razón de éstos se refiere explícitamente a dos fenómenos íntimamente relacionados: 1)

La expansión humana que se expresa en la ocupación, explotación y predominio de la especie en prácticamente todos los ecosistemas y rincones del planeta; y, 2) la lógica de producción-consumo industrial (Guzmán, Manzanares y Himilce, 2012; Calva-Alejo y Rojas-Caldelas, 2014).

Al respecto, Oblitas, et al. (2019) manifiestan que en la actualidad y dada “las crecientes preocupaciones sobre el uso restringido de los recursos naturales, el desafío de la sostenibilidad ambiental y las leyes ambientales, el impacto de eliminar los productos al final de la vida útil, ha recibido

una atención considerable” (p.197), por lo cual es necesario una gestión eficiente de los desechos no solo a nivel empresarial sino también de manera personal.

La gestión integral de la recolección de los RSU básicamente está referida al conjunto articulado de acciones a desarrollar desde el ámbito económico, operativo, administrativo, social, de supervisión, monitoreo y educación, que permitan el manejo de los residuos sólidos urbanos desde su generación hasta su disposición final para obtener beneficios económicos, sociales y ambientales (De Valle, 2005; Vij, 2012; Onofre, 2014; Zaman, 2014; Oblitas, et al., 2019).

En este sentido, para organizar la problemática enfrentada por los investigadores en los últimos cinco años, se realizó una revisión de los artículos que se relacionan con esta disciplina en revistas referenciadas en las *web* de ciencias. Es por eso, que se consultaron los trabajos publicados en revistas científicas de “*science direct*” que incluyeran frases como “*A methodological tool for the management of municipal solid waste*”, “*Key goal indicator, key performance indicator, key integral of solid urban waste*”, “*Mathematical models used in the management of urban solid waste*” y “*Assessment of Municipal solid waste Management*”, en el título, palabras clave o resúmenes, acumulando un total de 525 artículos o resúmenes.

En lo relacionado con modelos multicriterio, Lee, et al. (2016) desarrolló un modelo que adopta programación lineal entera y programación entera mixta para el proceso de recolección de residuos sólidos municipales, al igual que Akhtar, et al. (2017), el cual aplica un algoritmo de búsqueda para la recolección eficiente de los residuos y la optimización de las rutas. Por su lado, Sukholthaman y Sharp (2016) propone un modelo de dinámica de sistemas con el fin de evaluar los efectos de la separación en los puntos de generación de los RSU. Nguyen-Trong, et al. (2017), para la optimización del transporte de los RSU, emplea un Sistema de Integración Geográfica (GIS) en donde se reduce los costos en un 11%.

De igual manera, redes neuronales

artificiales para la gasificación de residuos sólidos municipales en un reactor es lo que propone Pandey, et al. (2016). Predecir la cantidad de RSU, en los puntos de generación a través de redes neuronal artificial y regresión lineal es lo que aplica Azadi y Karimi-Jashni (2016), con la finalidad de predecir la tasa media de residuos generados. Asimismo, Santibañez-Aguilar, et al. (2013) aplica un modelo de optimización que selecciona simultáneamente las tecnologías de procesamiento y su ubicación en la generación de los residuos de las ciudades. Un algoritmo estocástico de programación no lineal (Saif, et al., 2019), para determinar la capacidad de los puntos de generación de los RSU. También, un modelo de optimización propone Mohsenizadeh, Kernal y Kentel (2020) para minimizar costos en los procesos de recolección.

Por consiguiente, las investigaciones relacionadas con la administración de los residuos sólidos, no le enfocan como una cadena de suministros, además, su gestión se lo realiza por separado, es decir, a los procesos de generación, transporte, tratamiento y disposición final. De la misma manera, los indicadores de desempeño que proponen, se lo realiza por proceso y no existe un indicador integral que determine el mejoramiento de la cadena. Finalmente, los procedimientos propuestos para la gestión de los residuos sólidos urbanos, en su mayoría se enfocan al análisis ambiental, lo que en conjunto constituye el vacío de la ciencia que con la presente investigación se propone resolver.

Al respecto, cabe destacar que en Ecuador, desde el año 2002 hasta el 2010 la situación a nivel nacional no había variado elocuentemente, de un total de 221 municipios, 160 colocaban sus desechos en botaderos a cielo abierto, perjudicando y contaminando los recursos tales como el suelo, agua y aire; con la supeditada afectación a la salud de la población y en especial de los grupos de minadores que trabajaban en condiciones inadecuadas. Los otros 61 municipios, exhibían un manejo de sus desechos con insuficientes criterios técnicos, en sitios de disposición final parcialmente controlados.

Bajo este contexto, el Gobierno Central a través de su Ministerio del Ambiente, en abril del año 2016, crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS), con el objetivo primordial de impulsar la gestión de los residuos sólidos en los municipios del Ecuador, con un enfoque integral y sostenible; con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos e impulsando la conservación de los ecosistemas; a través de estrategias, planes y actividades de capacitación, sensibilización así como estímulo a los diferentes actores relacionados (Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador, 2016). Al respecto, Ordoñez y Ochoa (2020) en un estudio realizado en Loja-Ecuador, evidenciaron que:

Entre los principales problemas ambientales que percibe la comunidad están, la pérdida de los recursos naturales (19%), incremento en la producción de desechos sólidos domiciliarios (13%), contaminación del agua (12%), extinción de especies y cambio climático (9%), uso de pesticidas (8%), consumismo (7%), contaminación de aire y ruido (6%), degradación del suelo (4%) y otras el 2% restante. (p.187)

Es por ello, que Ormazza, et al. (2020) manifiestan que por lo menos las empresas deben observar “la necesidad de reinventar sus estructuras productivas, en búsqueda de una producción más limpia” (p.176-177), siendo más responsables con el ambiente y la sociedad. De allí, que tal como lo señalan Cevallos, Urduñeta y Jaimes (2019), se requiera “analizar las interrelaciones complejas que se establecen entre los ecosistemas y las culturas o estudio de las ciencias ambientales”, además de una gestión eficiente de los recursos y procesos.

En este sentido, a pesar de la creación del PNGIDS, no obstante, no se establecieron medidas de desempeño, a niveles estratégicos, tácticos y operativos de los procesos, de las acciones de gestión integral, que permitan obtener, lo que se propone actualmente el gobierno del Ecuador. De igual manera, no se

hicieron una asignación óptima de los recursos disponibles en los procesos de recolección, transporte, transferencia y tratamiento de los residuos sólidos urbanos, por lo que pudieran no cumplirse las metas fijadas en el PNGIDS sobre minimización del uso de transportación, minimización de costos y maximización de la satisfacción del cliente, considerando además que estos procesos son llevados a cabo por entes públicos de Ecuador, obliga más aun a que la gestión de estos sea eficiente y racional.

Sobre el tema de la gestión integral de residuos sólidos urbanos en el Ecuador, se realizó una revisión de la literatura, consiguiendo que existen aproximadamente 20 trabajos desde el 2013 hasta el 2018, que tratan el tema aplicado a diversos cantones del país. Hasta ahora todas las que se han desarrollado hacen un planteamiento del marco jurídico que se aplica en Ecuador del tema y hace propuestas de modelos de tipo administrativos con el fin de dar solución o mejorar los procesos que forman parte de la gestión integral de residuos sólidos.

La investigación de Cevallos (2015), es la única que plantea una metodología de diseño de rutas para la optimización del proceso, pero esta no lo hace desde el punto de vista del modelamiento matemático multicriterio y además no estudia el proceso completo de gestión de residuos sólidos, es decir, carecen de un estudio integral, solo incluye la generación y la recolección. No obstante, se observa entonces el vacío de conocimiento en el estudio del mismo, desde el punto de vista de la modelación matemática multicriterio en las investigaciones realizadas en Ecuador, es decir, no utilizan sistemas de funciones objetivos con sus restricciones para hacer propuestas de mejora u optimización de los mismos.

A tenor de lo anterior, se resume la necesidad de establecer un modelo multicriterio, que permita analizar la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo ubicado en la provincia de Los Ríos en Ecuador, con un enfoque de cadena de suministros, sobre la base de las decisiones, táctico y operativas científicamente

justificadas sujetas al ámbito económico, social y ambiental, a través de la modelación matemática multicriterio de los procesos de recolección, transporte, transferencia y tratamiento de los residuos sólidos urbanos.

## **1. Metodología**

El problema de la cadena de suministro de la gestión de los residuos sólidos urbanos, consiste en determinar la cantidad de unidades recolectoras – transportadoras y sitios de separación, necesarios para cumplir con los requerimientos de costo, impacto ambiental y satisfacción de los clientes, que no han sido corregidos en los últimos años por las autoridades locales (Teixeira, et al., 2014). Al respecto, se debe tomar la decisión de analizar y solucionar tal problemática, por lo cual Moya, López y Artigas (2018), sostienen que:

En la medida en la cual la decisión es la elección entre varias alternativas para resolver un problema o mejorar una situación, puede afirmarse que es intencionada, la misma se realiza para conseguir unos objetivos determinados, además de racional porque buscan las mejores alternativas para solucionar un problema. Por ser un proceso intencionado así como racional, debe ser analizado además de planificado siguiendo unas determinadas pautas de actuación. (p.108)

En ese sentido, con la finalidad de solucionar el problema anteriormente descrito, se desarrolló un modelo de optimización multicriterio para el proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos, que será una representación aproximada de la situación real, con la suficiente capacidad de explicar el comportamiento de la misma (Teixeira, et al., 2014). Para ello, se proponen los pasos siguientes:

1. Caracterización de la cadena de suministros.
2. Definir los flujos actuales de la cadena.
3. Determinación de los elementos componentes del modelo matemático

multicriterio.

4. Determinación del número de alternativas.

5. Valoración de los resultados obtenidos.

### **1.1. Caracterización de la cadena de suministros**

Contiene la determinación de las funciones generales y tareas logísticas de la cadena, así como el método organizativo y las políticas así como procedimientos clave. Para la presente investigación se seleccionó la localidad de Quevedo, la cual es una ciudad ecuatoriana cabecera de cantón que lleva el mismo nombre, forma parte de la provincia de Los Ríos.

En cuanto a la gestión de los residuos sólidos en esta ciudad, hasta agosto de 2018, la responsabilidad de llevar a cabo estas actividades era de la Empresa Pública Municipal de Aseo y Gestión Ambiental del Cantón de Quevedo (EPMAGAQ), pero debido a problemas financieros e insuficiencia de presupuesto, lo que repercutió en la disponibilidad de recursos operativos suficientes para las actividades de recolección de residuos sólidos urbanos, se decidió liquidarla y transferir la responsabilidad de la recolección de los residuos al Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal del Cantón de Quevedo (Municipalidad de Quevedo, 2018).

#### **a. Definición de los procesos y requerimientos operacionales**

##### **1. Recolección (generación):**

Considerado como el punto de inicio de la cadena, se refiere a los sitios en donde se acumulan los residuos sólidos urbanos, los cuales ya tienen que estar definidos previamente por la empresa encargada de la recolección. Estos sitios corresponden a las zonas en donde están ubicados los contenedores

para que los habitantes coloquen los residuos que generan. Para la cuantificación de la cantidad de los residuos sólidos urbanos que se generan, se utiliza el índice de Generación de Residuos Sólidos Per Cápita (PPC), su estimación depende de la cantidad de población y características socioeconómicas. Viene expresada en las unidades kg/(hab\*día), con este índice se puede determinar la cantidad de maquinaria necesaria, así como equipo y personal para las actividades de recolección. Su expresión matemática viene dada por la ecuación (1):

$$PPCi = \frac{W}{P} \quad (1)$$

Donde: W: generación de residuos recolectada al día, expresada en kg/día; y, P: cantidad de habitantes por zona.

En cuanto al sistema de recolección, se usa el de contenedores, los cuales se ubican en sitios específicos de la vía pública de manera que la población debe llevar los residuos que generan hasta esos contenedores, estos son de grandes dimensiones con capacidad de 1.050 kg cada uno, en donde la población debe verter los residuos generados en sus hogares, así mismo debe hacerse en las áreas comerciales. Son contenedores únicos, es decir, los residuos se colocan todos mezclados, y así los recoge el camión compactador. Existe un total de 250 contenedores dispuestos para que la población deposite los residuos sólidos urbanos. Los problemas asociados a este tipo de sistema son las quejas de los vecinos próximos a estos por la presencia de vectores sanitarios, malos olores, entre otros. En la Tabla 1 se muestran la generación de estos residuos.

**Tabla 1**  
**Generación de residuos sólidos en el cantón de Quevedo**

Parroquia	Población	Producción recolectada (kg/día)	PPC (kg/hab*día)
La Esperanza (parroquia rural)	4.853	8.000	1,65
Quevedo (parroquias urbanas)	158.694	264.000	1,66
San Carlos (parroquia rural)	10.028	8.000	0,80
Total	173.575	280.000	1,37

**Fuente:** Elaboración propia, 2020.

Otro indicador que se puede estimar es el de cobertura de recolección, el cual se estima como la división del total de toneladas de residuos sólidos recolectados entre el total de toneladas generadas al día, este se expresa en porcentaje. Hay de dos tipos:

Cobertura de recolección en relación con los residuos generados (Crg):

$$Crg = \frac{Ttr}{Ttg} \times 100 \quad (2)$$

Donde: Crg: cobertura de recolección

expresada en porcentaje; Ttr: total de toneladas (t) recolectadas; y, Ttg: total de toneladas (t) generadas.

Cobertura de recolección en relación con la cantidad de habitantes atendidos (Crc):

$$Crc = \frac{Ha}{Th} \times 100 \quad (3)$$

Donde: Crc: cobertura de recolección (%); Ha: habitantes atendidos; y, Th: total de habitantes. En la Tabla 2, se pueden observar

ambas coberturas.

**Tabla 2**  
**Cobertura de recolección**

Parroquia	Crg (%)	Crc (%)
La Esperanza	91,12	93,21
Quevedo	94,28	91,43
San Carlos	95,21	94,13
Promedio	93,54	92,92

**Fuente:** Mancomunidad Mundo Verde, Ministerio del Ambiente y Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (2016).

El modelo de recolección que se utiliza en el cantón de Quevedo es en masa, lo que implica que los residuos se recogen mezclados, no se realiza selección en el origen, ni tampoco una selección posterior, a pesar de que en algunos sitios públicos hay contenedores pequeños para separar los residuos sólidos en plástico, papel y cartón y orgánicos, pero al momento de hacer la recolección el vehículo toma cada contenedor y vierte su contenido en la compactadora, mezclando los residuos sólidos. En la Tabla 3, se puede apreciar los diversos tipos de residuos que se recolectan.

**Tabla 3**  
**Desglose por tipo de residuos**

Tipo de residuo	%
Orgánicos	62
Papel y cartón	8
Vidrio	2
Plásticos	9
Chatarra	3
Residuos sólidos no recuperables	16
Total	100

**Fuente:** Mancomunidad Mundo Verde, Ministerio del Ambiente y Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (2016).

**2. Transferencia/ separación:** En este caso se hace uso de estaciones de transferencias, en donde los camiones compactadores vierten los residuos sólidos que han sido recolectados de los sitios de generación, para proceder a su clasificación entre material de papel, cartón, plástico, vidrio, metal, material orgánico y desechos no recuperables; y de ahí son

cargados por otros vehículos para llevarlos a tres destinos distintos, que son los llamados de tratamiento, compostaje y disposición final.

**3. Tratamiento:** Es el sitio donde se almacenan los desechos separados en materiales de papel, cartón, plástico, vidrio y metal. Los mismos que serán enviados a los diferentes clientes para su utilización o comercialización como materia prima en las pequeñas, medianas o grandes empresas de la localidad o a nivel nacional.

**4. Compostaje:** Sitio destinado al almacenaje del material orgánico, el mismo que será enviado a los diferentes clientes que lo utilizarán como materia prima para actividades relacionadas con la agricultura (humus), o como combustible para las energías alternativas.

**5. Disposición final (relleno sanitario):** Sitio en el cual, a través de un procedimiento adecuado, serán depositados los desechos que no se pueden recuperar.

## **b. Aspectos económicos de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos**

Desde el punto de vista económico la gestión integral de los residuos sólidos se puede caracterizar por los parámetros de costos, asociados a cada una de las etapas de este proceso, definidas en el punto anterior como: Generación, separación, tratamiento, compostaje y disposición final. En ese sentido, es importante considerar dos tipos de costos, los de operación y los de transportación.

En cuanto a los costos de operación, éstos están relacionados con actividades como: La clasificación de los residuos, manipulación y almacenaje de los residuos sólidos urbanos. La clasificación, es la operación mediante el cual el personal realiza la separación de los residuos sólidos urbanos en materiales de papel, cartón, plástico, vidrio, metal, material orgánico y material no recuperable. En la manipulación, hay que considerar los costos relacionados con maquinarias y equipos adecuados para el acopio del material clasificado. Finalmente, el almacenaje,

corresponde a los costos relacionados con el resguardo de los materiales clasificados hasta sus traslados a su posterior destino.

En lo relacionado con los costos de trasportación, este es considerado como un costo variable, puesto que dependerá de la cantidad de viajes a realizar por los medios de transporte (camiones) adecuados para cada eslabón de la cadena. Se lo puede determinar mediante la ecuación (4):

$$C = Cv * Cu \quad (4)$$

Donde: C: costos de transportación; Cv: cantidad de viajes del camión; y, Cu: costo unitario de transportación.

En el cálculo de la cantidad de viajes que debe dar un camión se debe tener en cuenta los tiempos que toma en cargar, descargar y trasladarse el mismo de un lugar a otro. Se determina con la ecuación (5):

$$Cv = \frac{T}{tc + tpi + tpr + td} \quad (5)$$

Siendo:

$$tpi = \frac{d}{vi} \quad (6)$$

$$tpr = \frac{d}{vr} \quad (7)$$

Donde: T: período de trabajo; tc: tiempo de carga; tpi: tiempo de traslado de ida (con carga); tpr: tiempo de traslado de retorno (sin carga); td: tiempo de descarga; d: distancia de traslado,  $\overline{vi}$ : velocidad promedio del camión de ida (con carga); y,  $\overline{vr}$ : velocidad promedio del camión de retorno (sin carga).

En la Tabla 4, se resumen los costos que se relacionan con la gestión integral de los residuos sólidos urbanos.

**Tabla 4**  
**Costos asociados a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos**

Descripción	Cantidad	Unidades de medición
Cantidades de residuos recolectados	70.000	toneladas
Cantidades de residuos tratados	58.800	toneladas
Cantidad de residuos dispuestos finalmente	11.200	toneladas
Distancias	222.285	km
Costo transporte unitario promedio	3	\$/km
Costos fijos de residuos tratados	225.870	\$/año
Costos variables de residuos tratados	323	\$/toneladas
Costos fijos de residuos dispuestos finalmente	237.500	\$/año
Costos variables de residuos dispuestos finalmente	148	\$/toneladas
Costos fijos de recolección	265.300	\$/año
Costos variables de recolección	10	\$/toneladas
Costo total anual de operaciones del proceso	22.745.525	\$/año
Gastos por compras de materiales	535.800	\$/año
Ingresos totales	26.460.000	\$/año
Ganancia	3.178.675	\$/año

**Fuente:** Elaboración propia, 2020 a partir de datos del Proyecto (Mancomunidad Mundo Verde, 2014-2016).

### c. Aspectos ambientales de la gestión de los residuos sólidos urbanos

Para el impacto ambiental de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos, se necesita primero hacer una caracterización de los aspectos físicos, climáticos, biológicos y zonas sensibles. En lo relacionado con el aspecto físico, es necesario realizar una descripción de la topografía donde está funcionando la cadena de suministros, considerando aspectos que puedan afectar como la hidrología, la geología e hidrogeología. En cuanto a la caracterización climática, esta tiene que ver con los aspectos relacionados con las temperaturas ambientales, así como también las precipitaciones anuales. En la caracterización biológica, habrá que destacar aspectos relacionados con la flora, la fauna, avifauna, herpetofauna y entomofauna. Finalmente, es necesario caracterizar las zonas sensibles que pudieran afectar la cadena de suministros.

Una vez realizada la caracterización del área involucrada en este estudio, se procede a realizar la evaluación del impacto ambiental del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos, para esto se consideró la matriz de Leopold, la cual es una metodología creada en la década de los 70 del siglo pasado por el Dr. Luna Leopold, originalmente para ser aplicada en proyectos de construcción, pero se puede adaptar para ser aprovechada en variedad de ámbitos (Leopold, et al., 1971). En cuanto a la medición del impacto ambiental, este se hará considerando los impactos negativos y los positivos que se pueden obtener mediante la matriz de Leopold. Las ecuaciones son las siguientes:

$$IA = \frac{IAP}{IAN} \quad (8)$$

$$IAP = \sum_{i=1}^n MP_i \quad (9)$$

$$IAN = \sum_{j=1}^m MN_j \quad (10)$$

Donde: IAP: Impacto ambiental positivo; IAN: Impacto ambiental negativo;  $MP_i$ : Magnitudes positivas  $i$ ;  $y$ ,  $MN_j$ : Magnitudes negativas  $j$ .

### d. Nivel de servicio al cliente de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos

Para determinar la satisfacción de los clientes, se aplicó el procedimiento propuesto por Hernández (2011), en este se plantea la utilización de un instrumento, que permite medir la satisfacción de los clientes considerando una serie de atributos, el logro y la importancia que le da a cada uno de estos, dentro del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos (Ruiz, 2014) (ver Tabla 5).

$$\text{Satisfacción de clientes} = \frac{\sum_{i=1}^n IA_i * EA_i}{5} \quad (11)$$

Donde:  $n$ : cantidad de atributos;  $IA_i$ : Importancia del atributo  $i$ ;  $y$ ,  $EA_i$ : Estado actual del atributo  $i$ .

**Tabla 5**  
**Importancia ponderada de los factores de satisfacción del cliente**

F	Calidad del servicio	Frecuencia de las rutas de recolección	Cumplimiento de las rutas de recolección	Cantidad de residuos sólidos recolectados	Trato del personal
IP	13,31	14,67	15,29	15,15	6,55

F	Correspondencia entre valor del servicio y calidad de este	Control de malos olores	Control de derrame de lixiviado y restos de residuos sólidos en la vía pública	Preocupación por la conservación de las unidades compactadoras y contenedores	Preocupación por la conservación del paisaje
IP	10,66	10,10	6,72	3,90	3,03

**Nota:** F: Factor; IP: Importancia ponderada.

**Fuente:** Elaboración propia, 2020.

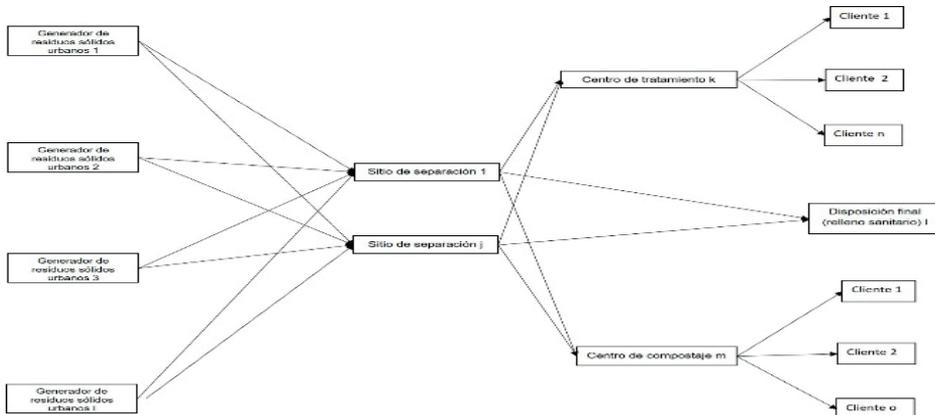
## 1.2. Definir los flujos actuales de la cadena

El flujo material comienza con el transporte de los residuos en los sitios de generación, que actualmente en la ciudad de Quevedo son 20 y son trasladados hasta los tres sitios de separación, en el cual se deben separar todos los residuos sólidos urbanos que son recolectados de las fuentes generadoras. En este lugar, los residuos son clasificados en tres grandes grupos.

El primer grupo, corresponde a los materiales formado por papel y cartón, plásticos, vidrio y chatarra, los que serán enviados a los sitios denominados de tratamiento. El segundo grupo, está conformado por los materiales orgánicos, los mismos que serán enviados al centro de compostaje. El tercer grupo, está

compuesto por materiales que no pueden ser recuperados, los cuales finalmente se enviarán al relleno sanitario.

En los sitios de tratamiento, que son dos, los materiales ya separados y clasificados, son almacenados hasta ser vendidos a los diferentes clientes según su necesidad; de la misma forma funciona con los sitios de compostaje que actualmente son tres en la ciudad, se corresponden a material orgánico y se incluyeron 14 clientes. Si los residuos sólidos no son recuperables, o forman parte de los tipos que aún no pueden ser tratados en la red, entonces estos son trasladados al relleno sanitario que es la disposición final, se consideró uno solo, el cual es el que reúne las condiciones necesarias para ser utilizado como tal (ver Figura I).



Fuente: Elaboración propia, 2020.

**Figura 1: Representación de la cadena de suministros de los residuos sólidos urbanos de Quevedo Ecuador**

Al respecto, el flujo informativo comienza con la solicitud de compra de los diferentes productos al departamento de ventas y compra por parte de los clientes. Este a su vez, realiza la solicitud a los diferentes sitios, la cual es analizada con los departamentos de economía y contabilidad. Luego, se hace la solicitud de compra de los productos. Una vez realizada estas solicitudes, los diferentes sitios informan al departamento de contabilidad, sobre la cantidad de productos solicitada y fecha de entrega de la misma.

Una vez que el producto está determinado para la compra, se manipula hacia los diferentes camiones que son de propiedad de los compradores, donde se le informa al departamento de compras y ventas que la solicitud está completa y este, al de economía y contabilidad. Al final de cada día, los diferentes centros (de tratamiento y compostaje) entregan un reporte al departamento de contabilidad donde se detalla el material consumido en la jornada. Este volumen de materiales consumido debe coincidir con el reporte diario que realiza el centro de separación. Cuando el cliente recoge los productos, firma el vale de

los productos comprados, pasando a realizar el pago de estos bienes por el departamento de ventas, donde se le firma la factura comercial.

### 1.3. Determinación de los elementos componentes del modelo matemático multicriterio

**a. Conjuntos:** Estos representan a cada uno de los grupos de datos que intervienen en el modelo multicriterio, entre ellos se encuentran los participantes que se muestran en la red de la cadena, así como lo relacionado con los materiales o productos a reciclar y los medios de transporte que se usan para tal fin. Estos permiten definir posteriormente las dimensiones de las matrices de datos de los parámetros que forman parte de las restricciones o limitaciones que tiene el sistema estudiado. Estos están representados por:

I: Sitios de generación ( $i=1, 2, \dots, m_i$ )

J: Centros de separación ( $j=1, 2, \dots, m_j$ )

K: Centros de tratamiento ( $k=1, 2, \dots,$

$m_k$ )

L: Centros de compostaje ( $l=1, 2, \dots, ml$ )

M: Relleno Sanitario ( $m=1, 2, \dots, mm$ )

O: Clientes de los productos tratados  
( $o=1, 2, \dots, mo$ )

R: Clientes de los productos de compostaje ( $r=1, 2, \dots, mr$ )

P: Camiones de generación a separación  
( $p=1, 2, \dots, mp$ )

Q: Camiones de Separación a Centros de tratamiento ( $q=1, 2, \dots, mq$ )

T: Camiones de Separación a Compostaje ( $t=1, 2, \dots, mt$ )

S: Camiones de Tratamiento a Clientes  
( $s=1, 2, \dots, ms$ )

W: Camiones de Separación a Relleno Sanitario ( $w=1, 2, \dots, mw$ )

U: Camiones de Compostaje a Clientes  
( $u=1, 2, \dots, mu$ )

V: Cantidad de productos de separación a centros de tratamientos ( $v=1, 2, \dots, mv$ )

**b. Variables de decisión:** Estas representan las incógnitas del modelo multicriterio. Se identificaron las variables de decisión pertinentes para la formulación de las cuatro funciones objetivo de forma tal que en sus estructuras hubiese una relación que indique una integración entre las cuatro, es por esto que se definieron variables de decisión que tomaran en cuenta las cantidades de residuos sólidos urbanos que fluyen a través de la cadena de suministro, que inicia con los generadores (sitios en donde están acumulados los residuos sólidos urbanos), pasando por los sitios de separación, que luego servirán a: El centro de tratamiento, el relleno sanitario, el centro de compostaje; y ambos centros a su vez servirán a sus respectivos cliente. Otras variables de decisión consideradas fueron la cantidad de viajes que se deben realizar entre cada uno de los involucrados en la cadena de suministro. Estas variables son:

Xijp: Cantidad de RSU a trasladar en el camión p desde el destino final de la ruta de recolección i al centro de separación j en el período.

Xjkqv: Cantidad de productos v a trasladar en el camión q desde el centro de separación j al centro de tratamiento k en el período.

Xjlt: Cantidad de productos a trasladar en el camión t desde el centro de separación j al centro de compostaje l en el período.

Xjmw: Cantidad de RSU no recuperables a trasladar en el camión w desde el centro de separación j al relleno sanitario m en el período.

Xkosv: Cantidad de productos v tratados a trasladar en el camión s desde el centro de tratamiento k al cliente o en el período.

Xlru: Cantidad de productos de compostaje a trasladar en el camión u desde el centro de compostaje l al cliente r en el período.

Yijp: Variable binaria de uso del camión p para ir del sitio de recolección i al centro de separación j.

Yjkq: Variable binaria de uso del camión q para ir del centro de separación j al centro de tratamiento k.

Yjmw: Variable binaria de uso del camión w para ir del centro de separación j al relleno sanitario.

Yjlt: Variable binaria de uso del camión t para ir del centro de separación j al centro de compostaje l.

Ykos: Variable binaria de uso del camión s para ir del centro de tratamiento k a los clientes del centro de tratamiento.

Ylru: Variable binaria de uso del camión u para ir del centro de compostaje a los clientes de compostaje.

Cijp: Costo de transportación del camión p para ir de la generación i al centro de separación j.

Cup: Costo de un viaje del camión p.

Cj: Costos de operación del centro de separación j.

Cjkqv: Costos de transportación del camión q para ir del centro de separación j al centro de tratamiento k.

Cuq: Costo de un viaje del camión q.

Ck: Costos de operación del centro de tratamiento k.

Cjlt: Costos de transportación del camión t para ir del centro de separación j al centro de compostaje l.

Cut: Costo de un viaje del camión t.

Cl: Costos de operación del centro de

compostaje l.

Cjmw: Costos de transportación del camión w para ir del centro de separación j al relleno sanitario m.

Cuw: Costo de un viaje del camión w.

Kosv: Costos de transportación del camión s para ir del centro de tratamiento k a los clientes de tratamiento o.

Cus: Costo de un viaje del camión s.

Clru: Costos de transportación del camión u para ir del centro de compostaje l a los clientes de compostaje r.

Cuu: Costo unitario del camión u.

dijp: Distancia a recorrer el camión p entre el sitio de generación i al centro de separación j.

djkq: Distancia a recorrer el camión q entre en centro de separación j al centro de tratamiento k.

djmw: Distancia a recorrer el camión w entre el centro de separación j y el relleno sanitario m.

djlt: Distancia a recorrer el camión t entre el centro de separación j el centro de compostaje.

dkos: Distancia a recorrer el camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o.

dlru: Distancia a recorrer el camión u entre el centro de compostaje l al cliente de compostaje r.

CSj: Capacidad del centro de separación j.

CTk: Capacidad del centro de tratamiento k.

CCI: Capacidad del centro de compostaje.

CRSm: Capacidad del relleno sanitario m.

DCo: Demanda de los clientes de tratamiento o.

DCr: Demanda de los clientes de compostaje r.

CVijp: Cantidad de viajes en el período del camión p desde el centro de generación i al sitio de separación j.

CVjkqv: Cantidad de viajes en el período del camión q desde el centro de separación j al centro de tratamiento k de los productos v.

CVjlt: Cantidad de viajes en el período del camión t desde el centro de separación j al centro de compostaje l.

CVjmw: Cantidad de viajes en el período del camión w desde el centro de separación j al relleno sanitario m.

CVkosv: Cantidad de viajes en el período del camión s desde el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o de los productos v.

CVlru: Cantidad de viajes en el período del camión u desde el centro de compostaje l al cliente de compostaje r.

Cp: Capacidad del camión p en un viaje.

Cq: Capacidad del camión q en un viaje.

Ct: Capacidad del camión t en un viaje.

Cw: Capacidad del camión w en un viaje.

Cs: Capacidad del camión s en un viaje.

Cu: Capacidad del camión u en un viaje.

Tt: Tiempo del período de trabajo.

tcpi: Tiempo de carga del camión p en el sitio de generación i.

tdpj: Tiempo de descarga del camión p en el sitio de separación j.

tpij: Tiempo de traslado del camión p entre el sitio de generación i al sitio de separación j.

Vpij: Velocidad promedio del camión p entre el sitio de generación i al sitio de separación j.

tcqj: Tiempo de carga del camión q en el sitio de separación j.

tdqk: Tiempo de descarga del camión q en el sitio de tratamiento k.

tjqk: Tiempo de traslado del camión q entre el sitio de separación j al centro de tratamiento k.

Vqjk: Velocidad promedio del camión q entre el sitio de separación j al centro de tratamiento k.

tctj: Tiempo de carga del camión t en el sitio de separación j.

tdtl: Tiempo de descarga del camión t en el centro de compostaje l.

ttjl: Tiempo de traslado del camión l entre el sitio de separación j al centro de compostaje l.

Vtjl: Velocidad promedio del camión

t entre el sitio de separación j al centro de compostaje l.

tcwj: Tiempo de carga del camión w en el sitio de separación j.

tdwm: Tiempo de descarga del camión w en el relleno sanitario m.

twjm: Tiempo de traslado del camión w entre el sitio de separación j y el relleno sanitario m.

Vwjm: Velocidad promedio del camión w entre el sitio de separación j y el relleno sanitario m.

tsk : Tiempo de carga del camión s en el centro de tratamiento k.

tdso: Tiempo de descarga del camión s en el cliente de tratamiento o.

tsko: Tiempo de traslado del camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o.

Vsko: Velocidad promedio del camión s entre el centro de tratamiento k al cliente de tratamiento o.

tcu: Tiempo de carga del camión u en el centro de compostaje l.

tdur: Tiempo de descarga del camión u en el cliente de compostaje r.

tulr: tiempo de traslado del camión u entre el centro de compostaje l y el cliente de compostaje r.

Vulr: Velocidad promedio del camión u entre el centro de compostaje y el cliente de compostaje r.

**c. Parámetros:** Los parámetros son los elementos del modelo matemático que permitirán estimar los valores de las variables de decisión en las funciones objetivo, así como formular las restricciones. Estos representan los datos necesarios y los coeficientes de

las variables de decisión para realizar el proceso de cálculo así como optimización de las funciones objetivo. Representan las capacidades de cada uno de los conjuntos del modelo, los valores de demanda de cada uno de los clientes, los valores sobre impactos ambientales, las distancias recorridas entre los involucrados en la cadena de suministro y los costos asociados a cada uno de estos.

**d. Estructura del modelo:** Está regida por cuatro funciones objetivos principales, Z1, Z2, Z3 y Z4. La primera, se trata de la minimización de los costos involucrados en las operaciones y transporte de los RSU. La segunda, involucra la minimización del uso de los camiones y las distancias recorridas. La tercera, incluye el aspecto social dado por la maximización del servicio prestado, como, por ejemplo, beneficios al trasladar la mayor cantidad posible de los mismos, desde los puntos de origen o recolección hasta los destinos programados; y, la última función, se relaciona con el impacto ambiental. Todas estas funciones sujetas a restricciones tanto administrativas como operativas, con la finalidad de dar respuesta al objetivo general de la investigación y así satisfacer las necesidades sociales detectadas en el planteamiento de la problemática objeto de estudio.

En este orden de ideas, se acota que el modelo matemático, se ajusta al conflicto de solución de dos o más funciones objetivos con restricciones específicas para cada función, es el que está enmarcado en el método de algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA). A Cont..., se presenta la estructura del modelo matemático.

Función Objetivo, minimizar Z1:

$$Z1 = \sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} (C_{ijp} + C_j) + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_v X_{jkqv} (C_{jkqv} + C_k) + \sum_j \sum_l \sum_t X_{jlt} (C_{jlt} + C_l) + \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} (C_{jmw}) + \sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} (C_{kosv}) + \sum_l \sum_r \sum_u X_{lru} (C_{lru}) \quad (12)$$

Función Objetivo, minimizar Z2:

$$Z2 = \sum_p D_{ijp} (Y_{ijp}) + \sum_q D_{ikq} (Y_{jkqv}) + \sum_w D_{jmw} (Y_{jmw}) + \sum_t D_{jlt} (Y_{jlt}) + \sum_s D_{kos} (Y_{kos}) + \sum_u D_{lru} (Y_{lru}) \quad (13)$$

Función Objetivo, maximizar Z3:

$$Z3 = \sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} + \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} + \sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} + \sum_l \sum_r \sum_u X_{lru} \quad (14)$$

Función Objetivo, maximizar Z4:

$$Z4 = I_a \left( \sum_j \sum_k \sum_q \sum_v X_{jkqv} + \sum_j \sum_l \sum_t X_{jlt} \right) + I_c \left( \sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} + \sum_l \sum_r \sum_u X_{lru} \right) - I_b \left( \sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} + \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} \right) - I_d \left( \sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} \right) \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_p X_{ijp} \leq C_{sj}, \quad \forall j \quad (16)$$

$$\sum_j \sum_k \sum_q \sum_v X_{jkqv} \leq C_{tk}, \quad \forall k \quad (17)$$

$$\sum_j \sum_l \sum_t X_{jlt} \leq C_{cl}, \quad \forall l \quad (18)$$

$$\sum_j \sum_m \sum_w X_{jmw} \leq I_{rsm}, \quad \forall m \quad (19)$$

$$\sum_k \sum_o \sum_s \sum_v X_{kosv} \geq D_{cov}, \quad \forall o, v \quad (20)$$

$$\sum_j \sum_r \sum_u X_{lru} \geq D_{cr}, \quad \forall r \quad (21)$$

$$0 \leq \sum_i \sum_j \sum_p Y_{ijp} \leq 1, \quad \forall p \text{ entero} \quad (22)$$

$$M(Y_{ijp}) \geq X_{ijp}, \quad \forall i, j, p \text{ enteros} \quad (23)$$

$$\sum_j \sum_k \sum_q \sum_v (Y_{jkqv}) \leq 1, \quad \forall q \quad (24)$$

$$M(Y_{jkqv}) \geq X_{jkqv}, \quad \forall j, k, q, v \text{ enteros} \quad (25)$$

$$\sum_j \sum_l \sum_t (Y_{jlt}) \leq 1, \quad \forall t \quad (26)$$

$$M(Y_{jlt}) \geq X_{jlt} \quad \forall j, l, t \text{ enteros} \quad (27)$$

$$\sum_j \sum_m \sum_w (Y_{jmw}) \leq 1, \quad \forall j, m, w \text{ enteros} \quad (28)$$

$$M(Y_{jmw}) \geq X_{jmw}, \quad \forall j, m, w \text{ enteros} \quad (29)$$

$$\sum_k \sum_o \sum_s (Y_{kos}) \leq 1, \quad \forall k, o, s \text{ enteros} \quad (30)$$

$$M(Y_{kos}) \geq X_{kos}, \quad \forall k, o, s \text{ enteros} \quad (31)$$

$$\sum_l \sum_r \sum_u (Y_{lru}) \leq 1, \quad \forall l, r, u \text{ enteros} \quad (32)$$

$$M(Y_{lru}) \geq X_{lru}, \quad \forall l, r, u \text{ enteros} \quad (33)$$

$$X_{ijp} \leq C_{vijp} * C_p, \quad \forall i, j, p \text{ enteros} \quad (34)$$

$$C_{vijp} = \frac{T_t}{T_{cpi} + T_{pij} + T_{dpj}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (35)$$

$$T_{pij} = d_{ij} / \tilde{V}_{pij} \quad (36)$$

$$X_{jkq} \leq C_{vj kq} (C_q), \quad \forall j, k, q \text{ enteros} \quad (37)$$

$$C_{vj kq} = \frac{T_t}{T_{c qj} + T_{qjk} + T_{dqk}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (38)$$

$$T_{qjk} = d_{jk} / \tilde{V}_{qjk} \quad (39)$$

$$X_{jlt} \leq C_{vjlt} (C_t), \quad \forall j, l, t \text{ enteros} \quad (40)$$

$$C_{vjlt} = \frac{T_t}{T_{ctj} + T_{tjl} + T_{dtl}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (41)$$

$$T_{tjl} = d_{jl} / \tilde{V}_{tjl} \quad (42)$$

$$X_{jmw} \leq C_{vjmw} (C_w), \quad \forall j, m, w \text{ enteros} \quad (43)$$

$$C_{vjmw} = \frac{T_t}{T_{c wj} + T_{wjm} + T_{dwm}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (44)$$

$$T_{wjm} = d_{jm} / \tilde{V}_{wjm} \quad (45)$$

$$X_{kos} \leq C_{vkos} (C_s), \quad \forall k, o, s \text{ enteros} \quad (46)$$

$$C_{vkos} = \frac{T_t}{T_{c sk} + T_{sko} + T_{dso}} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (47)$$

$$Tsko = dko / \check{V}sko \quad (48)$$

$$Xlru \leq Cvlru (Cs), \quad \forall l, r, u \text{ enteros} \quad (49)$$

$$Cvlru = \frac{Tt}{Tclu + Ttlru + Tdru} \quad (\text{redondeo por debajo del entero}) \quad (50)$$

$$Tlru = dlr / \check{V}lru \quad (51)$$

$$Cijp = Cvijp * (Cup) \quad (52)$$

$$Cikq = Cvjkq * (Cuq) \quad (53)$$

$$Cilt = Cvjlt * (Cut) \quad (54)$$

$$Cjmw = Cvjmw * (Cuw) \quad (55)$$

$$Ckos = Cvkos * (Cus) \quad (56)$$

$$Clru = Cvlru * (Cum) \quad (57)$$

Donde: Cup: Combustible, lubricante, mano de obra, mantenimiento, carga, descarga; Cj: Manipulación, clasificación, almacenaje; Ck: manipulación, almacenaje; y, Cl: manipulación, almacenaje.

La capacidad disponible de transportación de cada camión, (P, Q, T, S) es menor o igual a la sumatoria del total de cada flota de cada camión. M es un número mayor que la mayor cantidad de material que se pueda transportar en el período por el camión de mayor capacidad. Asimismo, tomados de la matriz Leopold: Ia: Impacto de recolección; Ib: Impacto de transporte; Ic: Impacto de compostaje y reciclaje; y, Id: Impacto de relleno sanitario

#### 1.4. Determinación del número de alternativas

Mediante la aplicación del *software General Algebraic Modeling System* (GAMS

por sus siglas en inglés) y teniendo en cuenta el análisis de la situación actual de la cadena logística objeto de estudio, tanto en sus eslabones independientes como en su integración se formulan todas las alternativas que puedan describir el funcionamiento de cada eslabón de la cadena y la integración de esta.

#### 1.5. Valoración de los resultados obtenidos

Se establece una comparación de los datos reales del diagnóstico de la cadena actual y los obtenidos con el modelo matemático, determinando los porcentajes de mejora en los aspectos económicos, ambientales y sociales.

### 2. Resultados y discusión

Se aplicó el programa computacional

GAMS para ordenar la información obtenida en matrices, que luego sirvieron para la optimización del proceso. La red que se modeló dispone de 20 fuentes generadoras de residuos sólidos urbanos, las cuales se corresponden a las localidades en donde están ubicados los contenedores en los cuales la población debe depositar los residuos para luego ser recolectados. Adicionalmente, se mencionan que se incluyeron tres tipos de medios de transporte, que se corresponden a camiones compactadores y para el traslado de los residuos sólidos urbanos entre cada eslabón de la red con capacidades de 12, 15 y 20 toneladas.

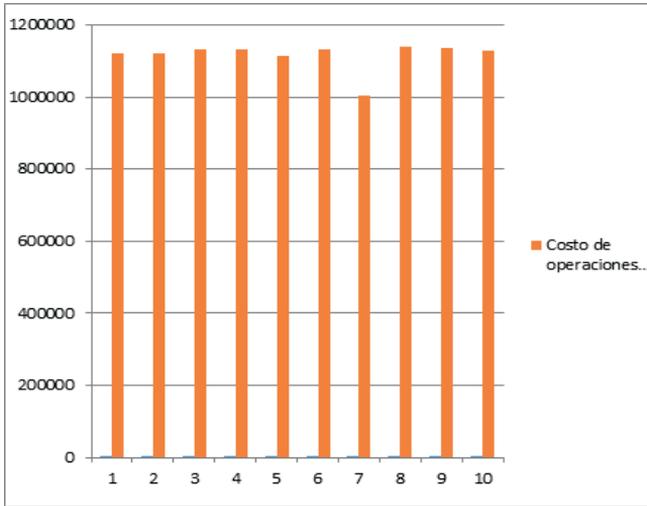
Una vez que se definieron las cantidades máximas de elementos de cada uno de los nueve conjuntos que contempla el modelo matemático y se elaboraron las matrices de datos necesarios para la aplicación del modelo, se procedió a introducir en el programa GAMS toda la información recolectada, se declararon las variables, se definieron los conjuntos, se introdujeron los parámetros, así como las matrices de datos. Finalmente, se agregaron las cuatro funciones objetivo y las 26 restricciones, utilizando el criterio de la frontera de Pareto, de forma tal que se considera como función objetivo principal la de minimización de costo, considerando los costos de operación, los de transporte, agregando las funciones del uso de los camiones con la distancia recorrida y la función ambiental, que contempla los impactos tanto positivos como negativos, en total, cuatro funciones objetivas.

El motivo por el cual se decidió plantear la función de costo como la principal, es que esta contiene todas las variables de decisión del modelo, que en la función de ahorro de

impacto ambiental también se incluyen, pero ésta es más compleja y por su forma no lineal se complica el proceso de optimización, mientras que en la de satisfacción del cliente, solo están presentes las variables de decisión que corresponden a las cantidades que fluyen por la red. Por lo tanto, al optimizar la ecuación principal se optimizan de una vez las otras dos funciones del modelo, puesto que las tres trabajan de forma integrada a través de las variables de decisión que incluye cada una, las cuales son: Las cantidades recolectadas, trasladadas, vendidas y dispuestas finalmente, así como las cantidades de viajes que involucra la red.

Para la optimización, se llevó a cabo un proceso que involucró un bloque de 23 ecuaciones, 19 parámetros, 13 variables de decisión, en 214 líneas y utilizando el método de solución de MINLP (minimización en programación lineal) del GAMS; se realizaron 81 iteraciones. El GAMS utiliza un procedimiento heurístico para el proceso de iteración, este consiste en ir probando un conjunto de datos en cada una de las funciones objetivo y restricciones, arrojando escenarios de optimización diferentes. Los resultados de la optimización generaron 81 escenarios posibles, que se corresponden a las 81 iteraciones realizadas.

En la Figura II, se muestra la comparación de los costos para cada uno de los 10 escenarios que se formularon. Se puede observar en el gráfico que en el escenario 7, se da la mejor opción en cuanto al ahorro en los costos operacionales. La diferencia entre el escenario 7 y los demás es significativa con respecto a los costos y se visualiza que este es favorecido por la optimización.

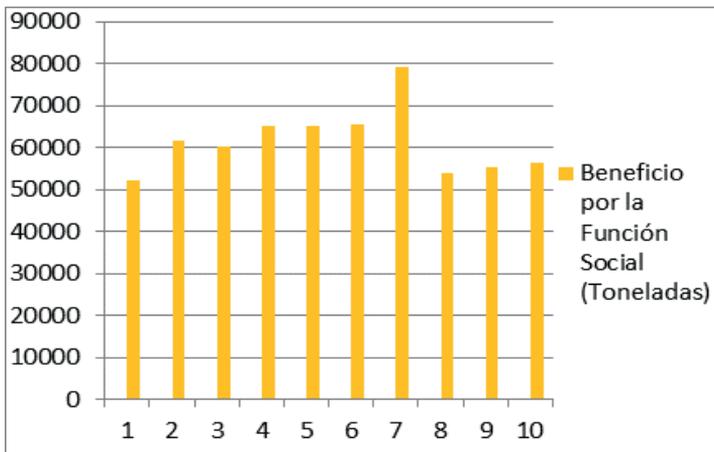


Fuente: Elaboración propia, 2020.

**Figura II: Costos de operación anual**

En cuanto al ahorro por el uso de camiones y distancias recorridas, el escenario 7 no sigue esta tendencia, debido a que no genera el menor valor entre los diez primeros

planteados por los resultados, pero en cuanto al beneficio por la función social en toneladas, sí. La Figura III, permite la observación visual de este aspecto detectado.

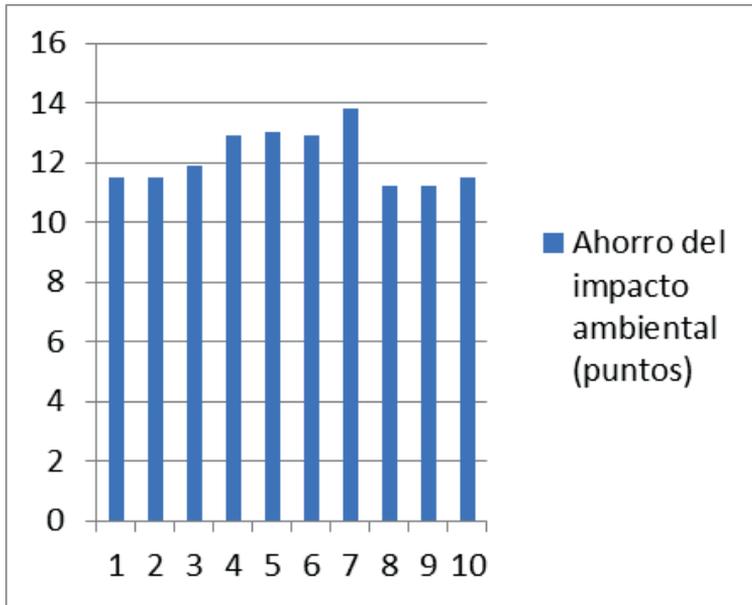


Fuente: Elaboración propia, 2020.

**Figura III: Beneficio social anual de la gestión integral de residuos sólidos urbanos**

De igual manera, el ahorro por el impacto ambiental (ver Figura IV), está por encima de los 13,7 puntos, indicando así que

el escenario 7, es el que genera la mejor opción de la optimización.



Fuente: Elaboración propia, 2020.

**Figura IV: Ahorro por el impacto ambiental de la cadena de suministros por la gestión integral de residuos sólidos urbanos**

La intención de los aspectos de la optimización, es evaluar las condiciones de los escenarios generados e identificar aquel que ofrezca una combinación más ajustada a las funciones objetivos planteadas, para así definir los indicadores que se utilizaron para medir la gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, y se puede observar en la Tabla 6 que esta característica

la cumple el escenario 7, que es el que ofrece una combinación de costo mínimo, máximo ahorro en impacto ambiental y el máximo beneficio por la función social, que conduce al logro de uno de los aspectos de la satisfacción al cliente; adicionalmente, es el escenario que tiene la mayor probabilidad de ocurrencia según los resultados obtenidos.

**Tabla 6**

**Valores de las variables de decisión para el escenario con mejor desempeño**

Escenarios	Cantidades trasladadas a cada sitio de recolección (toneladas)	Cantidades trasladadas al centro de tratamiento (toneladas)	Cantidades trasladadas al centro de compostaje (toneladas)	Cantidades trasladadas al relleno sanitario (toneladas)	Cantidades vendidas a los clientes del centro de tratamiento (toneladas)	Cantidades vendidas a los clientes del centro de compostaje (toneladas)
7	7,5124E+04	2,4929E+04	4,0673E+04	9,522E+03	2,4929E+04	4,0673E+04

**Fuente:** Elaboración propia, 2020.

La combinación óptima de las variables de decisión que hace que se obtengan los resultados esperados para mejorar la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el Cantón Quevedo de Ecuador, permite obtener lo evidenciado en la Tabla 6.

Estos valores de cantidades que fluyen por la red de la cadena de suministros de residuos sólidos urbanos si son comparados con la situación actual descrita, permiten verificar las mejoras que se plantean en el escenario 7, tal como se puede apreciar en la Tabla 7.

**Tabla 7**

**Comparación de situación actual con solución óptima**

Indicadores	Cadena de suministro actual	Cadena de suministro óptima	Porcentaje de mejoría (%)
Costo de operaciones (dólares)	22.745.525	1.035.000	-95,54
Ahorro del impacto ambiental (puntos)	0,40	13,789	+3.437,250
Beneficio por la función social (toneladas)	70.000	79.273	+13,24

**Fuente:** Elaboración propia, 2020.

Se puede observar una mejoría de los parámetros estudiados, siendo el ahorro en impacto ambiental el cambio más notable, el cual tuvo un incremento de 3.437,250%, así mismo la disminución de costos en un

95,54% y un aumento en el beneficio de la función social de un 13,24%. Si se desglosa la satisfacción al cliente, también se puede ver la mejoría en cada uno de sus componentes, lo cual se evidencia en la Tabla 8.

**Tabla 8**  
**Comparación de las cantidades que fluyen por el sistema entre la situación actual y la solución óptima**

Indicadores	Cadena de suministro actual	Cadena de suministro óptima	Porcentaje de mejoría (%)
Cantidades recolectadas (toneladas/año)	70.000	79.273	+13,24
Cantidades tratadas (toneladas/año)	58.800	65.602	+11,57
Cantidades dispuestas finalmente (toneladas/año)	11.200	9.522	-30,99

**Fuente:** Elaboración propia, 2020.

Como se aprecia en la Tabla 8, con el modelo optimizado se maximizan las cantidades recolectadas en un 13,24%, también se logra maximizar las cantidades de residuos sólidos urbanos tratados en un 11,57%, mientras que las cantidades de residuos sólidos urbanos que se disponen finalmente se minimiza en un 30,99%. Por lo tanto, el escenario 7 de la optimización se corresponde a una cadena de suministro óptima que generaría el máximo beneficio y el menor costo posible para la gestión integral de la misma, en el Cantón Quevedo. Como resultado de lo anterior queda demostrado que el modelo diseñado para describir matemáticamente la cadena de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, sirve para explicar su comportamiento y para obtener una mejor configuración de la red, que permita minimizar los costos de operación, maximizar la satisfacción al cliente y el ahorro en impacto ambiental.

En cuanto a las variables de decisión relacionadas con las cantidades de viaje que se realizan para transportar los residuos sólidos urbanos, actualmente se dispone de algunas unidades de capacidad de 12 toneladas y en algunos casos estos deben hacer hasta 3 y 4 viajes. De acuerdo con la optimización

planteada se agregan dos tipos de medios de transportes adicionales, que corresponden a camiones de 15 y 20 toneladas, los cuales permiten transportar mayor cantidad de residuos sólidos debido a su mayor capacidad, y con el agregado de dos sitios de separación adicionales, que están ubicados a una distancia adecuada, se logra disminuir la cantidad de viajes, es por ello que el ahorro en el impacto ambiental es mayor, puesto que los impactos negativos disminuyen, aumenta la cantidad de residuos sólidos urbanos recolectados, así como las cantidades de residuos sólidos tratados, disminuyendo las cantidades de residuos sólidos que se disponen finalmente en el relleno sanitario.

Al valorar los resultados obtenidos en esta investigación y mostrados en las Tablas 6, 7 y 8, que corresponden al escenario 7 de la aplicación del *software* GAMS del modelo aplicado a la cadena de suministros de los RSU del Cantón Quevedo, queda evidenciado que el modelo es idóneo para el mejoramiento de las variables de sostenibilidad que intervienen en los procesos.

Demuestra que, dada una situación actual, se pueden obtener mejores resultados si se analiza la gestión integral de los RSU con un enfoque de sostenibilidad; la

posibilidad de ser aplicado en otros cantones del Ecuador, que se ajusten a la estructura del Cantón Quevedo, pues comienza por la identificación de los problemas internos y externos de la organización así como permite la toma de decisiones dirigida a mejorar su funcionamiento. Su aplicación para la optimización de las variables de sostenibilidad que interviene en la gestión integral de RSU puede ser considerado una novedad.

## Conclusiones

La aplicación del modelo multicriterio permitió constatar su factibilidad y racional utilización como instrumento efectivo para perfeccionar el proceso de toma de decisiones, relacionadas con la organización y ejecución de las actividades de determinación de la mejor alternativa de funcionamiento de la cadena, de los recursos necesarios y la red logística adecuada, elevando la efectividad del proceso.

El análisis de la situación actual de la cadena de suministros de los residuos sólidos urbanos, permite revelar los principales problemas que afectan la cadena. En el orden interno, las principales dificultades se centran en el desaprovechamiento de las capacidades instaladas y de los recursos, así como, el bajo envío de las cantidades a ser vendidas a los diferentes compradores de los productos obtenidos.

El modelo matemático multicriterio, que, considerando los tres aspectos de la sostenibilidad, permite tomar estrategias de operaciones, entre los cuales está la disminución de viajes de los camiones (económico), con la consecuente reducción de la contaminación ambiental (ambiental), agregando dos sitios de separación adicionales en los cuales abarcaría personal para su operación (social), con la consecuente disminución de RSU que se van a disponer en el relleno sanitario.

A lo anterior puede añadirse que el modelo decisional multicriterio, posee como cualidad fundamental: La correspondencia con las tendencias actuales en los procesos de toma de decisiones y con las condiciones del objeto

de estudio en el cual se aplicó (pertinencia); la secuencia lógica en sus etapas así como la posibilidad de realizar un proceso amplio y complejo en forma relativamente simple, que permite la conducción del proceso de forma independiente por personal de la empresa, una vez que éste haya sido entrenado.

## Referencias bibliográficas

- Akhtar, M., Hannan, M. A., Begum, R. A., Basri, H., y Scavino, E. (2017). Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, 61, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>
- Azadi, S., y Karimi-Jashni, A. (2016). Verificación del desempeño de redes neuronales artificiales y regresión lineal múltiple en la predicción de la tasa media de generación de residuos sólidos municipales estacionales: Estudio de caso de la provincia de Fars, Irán. *Waste Management*, 48, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.034>
- Calva-Alejo, C. L., y Rojas-Caldelas, R. I. (2014). Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos urbanos en el Municipio de Mexicali, México: Retos para el logro de una planeación sustentable. *Información Tecnológica*, 25(3), 718-764. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000300009>
- Cevallos, G. M. (2015). *Una mirada en el futuro. Propuesta de mejora para el manejo de desechos sólidos en el centro de la municipalidad de Esmeraldas, Ecuador* (Tesis de pregrado). Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.
- Cevallos, M., Urdaneta, F., y Jaimes, E. (2019).

- Desarrollo de sistemas de producción agroecológica: Dimensiones e indicadores para su estudio. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXV(3), 172-185.
- De Valle, G. (2005). *La gestión integral sustentable de residuos sólidos urbanos: Diagnóstico y evaluación para la ciudad de Saltillo, Coahuila*. El Colegio de México.
- Guzmán, M., Manzanares, M., y Himilce, C. (2012). El manejo de los residuos sólidos municipales: un enfoque antropológico. El caso de San Luis Potosí, México. *Estudios Sociales*, 20(39), 235-261.
- Hernández, C. A. (2011). *Metodología de planificación de cadenas de suministro de productos de consumo masivo de alimentos envasados, aplicando los conceptos Lean y Agile, en el Perú* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya, España.
- Lee, C. K. M., Yeung, C. L., Xiong, Z. R., y Chung, S. H. (2016). A mathematical model for municipal solid waste management – A case study in Hong Kong. *Waste Management*, 58, 430-441. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.017>
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., y Balsley, J. E. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact*. Geological Survey Circular 645.
- Mancomunidad Mundo Verde, Ministerio del Ambiente y Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (2016). *I Foro de intercambio de experiencias: Gestión integral de residuos sólidos en mancomunidades, avances, desafíos y experiencias internacionales*. Presentación del caso Mancomunidad Mundo Verde (2014-2016). <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2016/10/7.-Mancomunidad-Mundo-Verde.pdf>
- Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador (2016). *Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS Ecuador*. <https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>
- Mohsenizadeh, M., Kernal, M., y Kentel, E. (2020). Municipal solid waste management with cost minimization and emission control objectives: A case study of Ankara. *Sustainable Cities and Society*, 52, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101807>
- Moya, F., López, D. D., y Artigas, W. (2018). Herramientas gerenciales desde el enfoque socio crítico en universidades: Estudio exploratorio en Venezuela y Colombia. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXIV(1), 101-112.
- Municipalidad de Quevedo (2018). *Ordenanza de liquidación y extinción de la Empresa Pública Municipal de Aseo y Gestión Ambiental de Quevedo*. GAD Municipal Quevedo. <https://acortar.link/obwqW>
- Nguyen-Trong, K., Nguyen-Thi-Ngoc, A., Nguyen-Ngoc, D., y Dinh-Thi-Hai, V. (2017). Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model. *Waste Management*, 59, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.048>
- Oblitas, J. F., Sangay, M. E., Rojas, E. E., y Castro, W. M. (2019). Economía circular en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXV(4), 196-208.
- Onofre, P. (2014). *Caracterización de los residuos sólidos urbanos generados en la cabecera municipal de Mazatepec, Morelos y sus potenciales efectos a la salud* (Tesis de maestría). Universidad

- del Valle de Cali, Cuernavaca, México.
- Ordoñez, A., y Ochoa, P. (2020). Ambiente, sociedad y turismo comunitario: La etnia Saraguro en Loja – Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVI(2), 180-191. <https://dx.doi.org/10.31876/rcs.v26i2.32433>
- Ormaza, J., Ochoa, J., Ramírez, F., y Quevedo, J. (2020). Responsabilidad social empresarial en el Ecuador: Abordaje desde la Agenda 2030. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVI(3), 175-193. <https://dx.doi.org/10.31876/rcs.v26i3.33241>
- Pandey, D. S., Das, S., Pan, I., Leahy, J. J., y Kwapinski, W. (2016). Artificial neural network based modelling approach for municipal solid waste gasification in a fluidized bed reactor. *Waste Management*, 58, 202-213.
- Ruiz, C. (2014). *Metodología para la gestión de la calidad del servicio de recepción de cruceros en el destino Santiago de Cuba* (Tesis doctoral). Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- Saif, Y., Riswan, M., Almansoori, A., y Elkamel, A. (2019). A decomposition algorithm for organic solid waste supply chain optimization under uncertainty. *Energy Procedia*, 158, 3284-3289. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.982>
- Santibañez-Aguilar, J. E., Ponce-Ortega, J. M., González-Campos, J. B., Serna-González, M., y El-Halwagi, M. M. (2013). Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste. *Waste Management*, 33(12), 2607-2622. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.010>
- Sukholthaman, P., y Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 52, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.026>
- Teixeira, C. A., Avelino, C., Ferreira, F., y Bentes, I. (2014). Statistical analysis in MSW collection performance assessment. *Waste Management*, 34(9), 1584-1594.
- Vij, D. (2012). Urbanization and solid waste management in India: present practices and future challenges. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 37, 437-447. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.309>
- Zaman, A. U. (2014). Measuring waste management performance using “Zero Waste Index”: The case of Adelaide, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 66, 407-419 .