

# Modelo Integrado de Localización y Transporte para la Logística Inversa de Residuos Eléctricos y Electrónicos en el Departamento de Córdoba, Colombia.

Integrated Location and Transportation Model for Reverse Logistics of Electrical and Electronic Waste in the Department of Córdoba, Colombia.

**Daniela Galván<sup>a</sup>, Yesit Mendez<sup>a</sup>, Victor Noble Ramos<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Colombia*

*\*Corresponding author: daniela.galvanr@upb.edu.co*

**Abstract**— Waste electrical and electronic equipment (WEEE) has a great potential for contamination. The reverse logistics of WEEE allows to identify and manage flows of equipment and parts that can be reused, exploited or destroyed. This article proposes the design of a logistics network for the transportation and exploitation of this types of waste in the department of Córdoba, Colombia. Additionally, a mixed integer linear programming model is proposed to integrate strategic-tactical decisions of the network such as the location of waste collection and transportation centers, maximizing gross profit. The results indicate that the mathematical model represents the proposed logistics network correctly. The model was validated and tested with various scenarios, reaching the optimum in all cases within reasonable times. Even in pessimistic scenarios, considerable profits were projected. This indicates untapped economic-environmental potential and opportunities for future research and development of business projects.

**Keywords**— Mixed integer linear programming, Optimization of operations, Reverse waste logistics, Waste electrical and electronic equipment.

**Resumen**— Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) tienen un alto potencial de contaminación. La logística reversa de los RAEE permite identificar y gestionar flujos de equipos y piezas que pueden ser reutilizadas, explotadas o destruidas. Este artículo propone el diseño de una red logística para el transporte y explotación de esta clase de residuos en el departamento de Córdoba, Colombia. Adicionalmente, se propone un modelo de programación lineal entera mixta, para integrar decisiones estratégico-tácticas de la red tales como la localización de centros de acopio y transporte de residuos, maximizando la utilidad bruta. Los resultados indican que el modelo matemático representa la red logística propuesta correctamente. El modelo fue validado y probado con diversos escenarios, llegando en todos los casos al óptimo en tiempos razonables. Incluso en escenarios pesimistas, se proyectaron utilidades considerables. Esto indica un potencial económico-ambiental desaprovechado y oportunidades para investigaciones futuras y desarrollo de proyectos empresariales.

**Palabras Claves**— Logística inversa de residuos, Optimización de operaciones, Programación lineal entera mixta, Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

## I. INTRODUCCIÓN

LA democratización del acceso a los aparatos eléctricos y electrónicos domésticos, ha estimulado el consumo de estas tecnologías, principalmente por las comodidades y beneficios que ofrecen.

Según cifras de Growth from Knowledge (GfK), para el cierre del 2018, el mercado global de aparatos electrónicos y electrónicos registró ventas totales de alrededor de 138 mil millones de euros [1]; reflejando el protagonismo que estos artículos tienen hoy en día.

Sin embargo, todos estos aparatos, al llegar al final de su vida útil o al ser considerados obsoletos, se convierten en basura electrónica, la cual es conocida muy comúnmente como RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), también se usan los términos e-waste o WEEE (Waste Electrical and Electronical Equipament). Estos desechos electrónicos están compuestos por una variedad de materiales como aluminio, cobre, plástico, oro, metales, plata y también contienen materiales como plomo, mercurio, cromo y antimonio, que al no ser manipulados cuidadosamente pueden resultar tóxicos y peligrosos tanto al medio ambiente como a la salud pública. [2].

La generación de estos residuos es un problema global con implicaciones importantes en sectores como el ambiental, económico y social, debido a su rápido crecimiento con respecto al consumo mundial de los dispositivos eléctricos y electrónicos. Lo anterior se evidencia en el informe del observatorio mundial de los residuos electrónicos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), publicado en (Baldé, Forti, Gray, Kuehr y Stegmann, 2017)[3], el cual estimó que, durante el año 2016 los países del mundo generaron en total 44,7 millones de toneladas métricas (Mt) de residuos electrónicos, de las cuales solo el 20% (8.9 Mt) fueron adecuadamente recolectadas y recicladas. El mismo informe refleja que el 80% restante de los residuos no se encontraba documentado, pero se estimó que el 4% (1,7 Mt) fueron arrojadas a la basura y del porcentaje restante, 76% (34,1Mt), se desconoce su paradero, suponiendo que probablemente fueron arrojadas, comercializadas o recicladas en condiciones no adecuadas. Así mismo, el estudio provee que el volumen de residuos electrónicos aumente hasta 52,2 millones de toneladas métricas a más tardar en 2021.

A pesar de que actualmente muchos países cuentan con legislaciones medioambientales, y se han establecidos convenios para regular el manejo de los RAEE, los esfuerzos por su manejo aún son insuficientes; dado al potencial de peligro que estos representan cuando no son sometidos a correctos procesos de disposición final y al ser una de las corrientes de residuos sólidos con mayores tasas de crecimiento anual en el mundo [4].

Tomando como caso particular, en Colombia, son muchos los departamentos que carecen de esquemas estructurados o mecanismos que permitan desarrollar procesos eficientes, para coordinar las etapas de la cadena logística (recolección, transporte, localización de centros de acopio) necesaria para la gestión de estos residuos, dado a que, esta clase de procesos traen consigo implicaciones, restricciones, decisiones estratégicas, tácticas y operativas. Por la naturaleza de los aparatos eléctricos y electrónicos se necesitan cuidados especiales para poder tratar estos residuos, se trabaja con una demanda dinámica y con una escasez de datos para su estimación.

Debido a la importancia de darle una mejor disposición final a los RAEE y tener bases para evaluar la factibilidad de la implantación de sistemas logísticos, este artículo propone mediante una serie de etapas sistemáticas, el diseño de una red de logística inversa, que permite integrar la recolección, el transporte, la localización de centros de acopios de estos residuos y la identificación de los flujos de aparatos que se puedan reciclar, reusar o aprovechar. Todo esto mediante la formulación de un modelo matemático que permitió tomar decisiones considerando todas las variables, restricciones, y parámetros pertinentes.

La modelación matemática permite incorporar los tres actores identificados, brinda la ventaja de estudiar diferentes escenarios, tomar decisiones estratégicas y tácticas teniendo en cuenta los costos, permite identificar lo que es importante

y ayuda a representar de manera realista el problema [5]; para no dejar a un lado consideraciones valiosas o incluir datos innecesarios, lo que en gran medida contribuye a la adecuada gestión de estos procesos de aprovechamiento de desechos.

Se tomó como estudio de caso al departamento de Córdoba- Colombia, puesto que, aun no se contempla una gestión especial para estos residuos ni se han desarrollado esta clase de alternativas de esquemas logísticos, además, el departamento es un buen foco de estudio por sus estimaciones de generación de RAEE.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

En la revisión de la literatura, se realizó una búsqueda en bases de datos de Scielo, Scopus y Google Académico. En la cual se utilizaron los términos “Problema de transporte para residuos”, “Red de logística inversa en RAEE” y “Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos”. Se hallaron artículos destacados en: manejo, características, requisitos, especificaciones y normativas de los RAEE, tanto a nivel mundial, como a nivel departamental. Se revisaron y se seleccionaron especialmente los trabajos con características similares al problema de la presente investigación.

El análisis de las investigaciones encontradas contextualizó y direccionó la investigación, entre ellas, el trabajo de (Burgos Meneses et al, 2017) [6] que propone la configuración de una red de logística inversa para residuos de neumáticos en Sao Paulo Brasil, por medio de la modelación del problema de transporte y localización. Igualmente sobresale el trabajo de (Suárez et al,2017) [7] el cual desarrolló un modelo de logística inversa, con énfasis en los RAEE tipo 3 en la ciudad de Bogotá. El modelo estimó los residuos a transportar de acuerdo con las rutas y los puntos de recolección, aplicando la reducción de los costos asociados al problema. Además, tuvo en cuenta el origen de las fallas en la gestión y la recuperación de esta clase de residuos.

Previamente, la investigación de (Ghezavati & Nia, 2015) [8] propuso, la aplicación de un modelo de programación no lineal entera mixta para una red logística inversa. Y el trabajo de (Qin, 2011) [9] presentó la solución al problema de apertura de plantas y centros logísticos en redes de logística inversa/directa teniendo en cuenta el problema de fabricación.

Por otro lado, el estudio de Quintero Ortega, (2016) [10] desarrolló un modelo de gestión de residuos tecnológicos para Ecuador, en el que se abordó la logística inversa, sus características, beneficios, importancia, y la formas de aplicarla con las tecnologías, para reducir el impacto ambiental. Del mismo modo la investigación de Castañeda et al., (2013) [11] destacó por la caracterización de la logística inversa para los residuos en Pantano de Vargas del Departamento de Boyacá – Colombia, por medio de rastreo

bibliográfico, técnicas analíticas y deductivas como observación directa y encuestas.

De igual importancia, la investigación de Calpa, J. (2020) [12] propone el diseño de una red de logística inversa para residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en la ciudad de Cali, Colombia, por medio de un modelo de simulación de varios escenarios, centrado en dinámica de sistemas con el software Vensim. Este estudio determinó que la implementación de un sistema de recolección para RAEE genera un potencial económico como resultado del crecimiento de la generación de este tipo de residuos en la ciudad de Cali.

Por otra parte, el trabajo de Grisales, D & Rave, A. (2019.) [13] planteó un sistema de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, mediante la construcción de matrices de aspectos e impactos ambientales, y matrices de medidas y aspectos legales. Estas herramientas ayudaron a determinar un proceso de tratamiento de RAEE y evidenciaron además un aumento en los índices de sostenibilidad, disminución en el impacto ambiental y un beneficio económico y social si se completa su implementación.

También, el estudio de (Morales et al, 2019) [14] define una ruta logística para distribución de RAEE a 24 centros de reciclado en la Ciudad de Puebla, México, con el uso de herramientas heurísticas y programación en Octave. De modo que se demostró la factibilidad de la implementación de este tipo de metodologías en la gestión de RAEE.

Otros trabajos que resaltaron por las características de sus problemas y el análisis de sus condiciones fueron; el trabajo de Serrano [15] el cual propone localizaciones óptimas de centros de transferencia y plantas de tratamiento para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en la provincia de Málaga, con el uso de modelos cuantitativos de localización de instalaciones y la programación lineal, algoritmo GA, algoritmo PSO. Lo cual demostró la efectividad de las herramientas heurística en las redes de logística inversa. El estudio de Monroy y Poveda (2017) [16] se destacó por la propuesta de localización de instalaciones que disminuyeron los costos y las cantidades de residuos en rellenos sanitarios, mediante la ubicación de centros de acopio en la localidad de Santa Fe y La Candelaria; para esto, utilizaron datos de la demanda, las distancias rectilíneas entre las bodegas y los centros de acopio.

La contribución de los anteriores trabajos apunta a un referente en los problemas de transporte de vehículos en la logística inversa de residuos, lo que muestra la alta aplicabilidad de la programación lineal en el diseño de una red de logística inversa para estos residuos. Además, los aportes de estas investigaciones llegan desde; la aplicación de herramientas como la indagación de patrones de datos y revisión bibliografía de: normas, políticas, lineamientos, y datos comerciales a nivel nacional, hasta las propuestas de redes logísticas planteadas para cierto grupo de residuos.

Sin embargo, hasta el momento la integración de decisiones de localización de centros de acopio y transporte

de RAEE en un modelo matemático de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés), no ha sido tratada por ningún autor. Por lo cual es la primera investigación en enlazar estos dos problemas de la programación lineal en un modelo integrado de logística inversa para el tratamiento de los RAEE.

Adicionalmente, el diseño de la red de logística inversa propuesta por la presente investigación tiene en cuenta el diagnóstico de la generación o demanda anual de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en la región de Córdoba, diagnóstico que se realiza por primera vez en este departamento.

### III. METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo axiomática descriptiva [17] puesto que, analiza, comprende y explica las características o comportamiento del problema tratado, para posteriormente poder modelarlo, mediante el uso de técnicas matemáticas y de esta manera contribuir a mejorar los estudios o investigaciones presentes en la literatura.

Luego de la revisión de literatura (Sección II) se procedió a ejecutar las siguientes etapas:

*Definición del alcance:* En esta etapa, se definieron claramente los tipos de aparatos eléctricos y electrónicos que se iban a tener en cuenta para el proceso de diseño de la red logística, para esto, primeramente, se optó por tomar los 19 aparatos de uso doméstico, que son estudiados año tras año en la encuesta de calidad de vida [18], realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en vista de que, esta brinda información histórica de la tenencia de estos aparatos en la región, datos que son pertinentes para el desarrollo de las siguientes etapas. Posteriormente se aplicó un filtro, evaluando y priorizando los aparatos más usados en la región, determinando de esta manera que solo serían utilizados algunos aparatos eléctricos y electrónicos multimedia. La investigación tiene en cuenta 8 aparatos (televisores convencionales y plasma, equipo de sonido, teléfono celular, consola para juegos electrónicos, tableta, computador de escritorio y portátil)

Esta identificación permitió la indagación sobre cada uno de estos artículos, con el objetivo de caracterizarlos, saber dentro de cual clasificación se encuentran, tamaños y pesos promedios, composición general, vidas útiles y si era necesario aplicarles algún cuidado específico al momento de ser manipulados o transportados. Para recopilar esta información, se tomaron fuentes convencionales como trabajos de investigación, estudios, informes, boletines, artículos de prensa, internet, publicaciones.

Análogamente, en esta etapa, se investigaron datos demográficos del departamento de Córdoba (número de habitantes, hogares, viviendas que contaran con el aparato seleccionado).

*Estimación y proyección de la demanda:* las cantidades de residuos de cada uno de los tipos de aparatos seleccionados, fueron estimadas mediante el método de estimación por consumo y uso de los aparatos (*consumption and use method*), el cual fue un método utilizado en varios estudios como (Blaser y Empa, 2009)[19] y (Casas *et al.*, 2015) [4] que buscaban de igual forma obtener un estimado de las cantidades de RAEE generados para poder desarrollar sus estudios y análisis. El método calcula la generación de RAEE suponiendo una cantidad de aparatos eléctricos y electrónicos por hogar.

Para realizar las estimaciones de cada tipo de aparato, se utiliza el peso promedio del aparato, número de hogares del territorio en el cual se busca estimar dicha generación, número de aparatos por hogar y la vida útil del aparato [20].

Atendiendo a lo anterior, la ec. (1) muestra la relación entre los parámetros mencionados.

$$\text{Generación RAEE}(n) = \frac{m_n * hh * r_n}{ls_n} \quad (1)$$

Con:

$m_n$  = peso promedio por aparato n

hh = número de hogares

$r_n$  = número de aparatos n por hogar

$ls_n$  = vida media del aparato n

El peso promedio por aparatos( $m_n$ ), fue estimado con base al promedio del peso unitario de 10 equipos de cada clase, los cuales fueron suministrados por un grupo de expertos; posterior a esto, los datos calculados fueron comparados con pesos encontrados en diferentes páginas de internet (blog, informes, trabajos, páginas de almacenes de electrodomésticos), para así contrastar y decidir el peso que fue elegido para cada uno de los aparatos en estudio.

Para la estimación del número de hogares (hh), se utilizaron los datos disponibles en las proyecciones de población departamentales por área [21] y en las encuestas de calidad de vida [18], ambas realizadas por el DANE; dado a que, el dato exacto de número de hogares en el departamento de Córdoba para el año 2019, al momento de realizar la investigación aún no se encontraba disponible.

Las series de proyección permitieron obtener el número de personas en el departamento de Córdoba estimadas desde el año 2008 al año 2018; las encuestas de calidad de vida proporcionaron el número de hogares y el índice de personas por hogar en cada uno de los años, pero, por regiones y no por departamentos, por lo cual fue necesario integrar estas dos bases de datos disponibles y realizar una estimación del número de hogares en el departamento de Córdoba en cada uno de los años anteriores. Cabe resaltar que los años 2017 y 2009 no fueron tenidos en cuenta al no encontrarse registro de estos.

Para esta estimación, se partió del supuesto de que la población del departamento y el número de hogares en la región (caribe o atlántica de Colombia) año tras año iban a

crecer en iguales proporciones. El índice de personas por hogar mostro variaciones a lo largo de los años, por lo cual, se procedió a graficar esta relación; con esto se comprobó que las variables presentaban un alto grado de correlación (coeficiente de correlación de Pearson 0,9151) y se procedió a realizar una regresión lineal, tomando como variable independiente el año y el índice de personas por hogar como variable dependiente; se obtuvo una ecuación de recta correspondiente a  $y = -0,053x + 110,7$ .

Con la regresión se obtuvo el índice de personas por hogar en la región caribe para el año 2019 y como se expresó anteriormente también fue tomado como el índice para el departamento de Córdoba. El cociente resultante entre la proyección de la población para el año 2019 en el departamento y el índice por hogar para ese mismo año, estimó el número de hogares con el que se trabajó.

Para la estimación del parámetro ( $r_n$ ), número de aparatos n por hogar, se utilizaron los datos de la tenencia de estos aparatos por hogar, propuestos en la cartilla de buenas prácticas ambientales en el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, desarrollada por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) en compañía de otras entidades [22] y el boletín de indicadores básicos de tenencia y uso de Tecnologías de la Información y Comunicación en hogares [23].

Por último, las vidas útiles de cada tipo de aparato ( $ls_n$ ) fueron tomadas de la cartilla [22] y del trabajo de investigación de “Priorización multicriterio de residuo de aparato eléctrico y electrónico” [4].

*Estudio de las características, restricciones del problema y propuesta de red logística:* paralelo a la etapa descrita anteriormente, se analizaron los factores y las consideraciones que se debían tener en cuenta para la logística de los RAEE, de igual forma, se tomaron decisiones para fijar algunas condiciones que iban a ser tenidas en cuenta al momento de plantear la formulación matemática del problema. En esta etapa se establecieron las diferentes alternativas que se podían implementar para el diseño de la red logística, tales como, el número de eslabones, de nodos y el funcionamiento de cada uno de ellos, se identificaron los posibles flujos que se podrían dar en la red, la forma de transportar los productos, las capacidades de los vehículos y los artículos que podían transportar. De igual forma, se pensó en el periodo de tiempo que se iba a tener en cuenta, los parámetros necesarios y en los costos en los que se incurriría al realizar este proceso. Cabe resaltar que las condiciones que se tomaron en esta etapa eran preliminares y estaban sujetas a cambios a lo largo del desarrollo del proyecto; las consideraciones finales serán explicadas detalladamente en la subsección de generación de instancias (Sección V).

*Formulación matemática y validación de modelo de programación lineal entera mixta (MILP):* Seguidamente, con la información de las estimaciones, implicaciones,



se les realiza primeramente un proceso de clasificación, que permite generar un flujo inverso con destino a un posible mercado de segunda mano de aparatos que se encuentran en buen estado ( $S_{ip}$ ). Posterior a esto se realiza un proceso de desensamble ( $T_{ip}$ ), donde se obtiene un flujo de componentes de cada uno de los aparatos que ya no pueden ser aprovechados ( $D_{ip}$ ), por lo cual van directo a desperdicio y otro flujo que envía a la planta de tratamiento los componentes de los cuales se pueden extraer materiales valiosos ( $Z_{ipr}$ ). Para esta instancia no se estudia el flujo saliente del proceso de reciclaje llevado a cabo en la planta ni se consideran inventarios.

La modelación matemática de la propuesta considera los siguientes conjuntos, parámetros, variables y restricciones:

### Conjuntos

V: Conjunto de todos los nodos.  
 E: Aristas que conectan a los nodos.  
 P: Productos clasificados.  
 E: Conjunto de todos los componentes.  
 $\xi_p$ : Conjunto de componentes del producto p.  
 $\Pi^c$ : Conjunto de aparatos que pueden recibir los centros de acopio.  
 $\Pi_i^m$ : Conjunto de aparatos que pueden recibir los mini centros i.  
 $\Delta_p^m \{i \in V : p \in \Pi_i^m\}$ : Conjunto de nodos que pueden recibir el aparato p.

### Parámetros

adj<sub>ij</sub>: Matriz de adyacencia.  
 $O_p$ : Oferta de RAEE d tipo p por parte de los hogares (kg).  
 $\theta_{ip}$ : fracción máxima de la oferta de RAEE tipo p por parte de los hogares atribuida al nodo i.  
 $\alpha_p$ : Fracción aprovechable del producto p en el mercado de segunda mano.  
 $\beta_{rp}$ : Fracción que representa el componente r del total del peso del producto p.  
 $d_p$ : Fracción desperdiciada del producto p después del desensamble.  
 $K_p$ : Peso en kg del producto p.  
 $W_{ij}$ : Distancia entre los nodos (i, j).  
 $Co_{ij}$ : Costo por viaje.  
 $CoInd_{ij}$ : Costo por kilogramo indirectamente enviado desde el nodo i al nodo j (unitario).  
 $Uwm_i$ : Costo de apertura y operación del mini centro i.  
 $Uwc_i$ : Costo de apertura y operación del centro i.  
 $PVS_p$ : Precio de venta del producto p en el mercado de segunda mano.  
 $PVZ_r$ : Precio de enviar un kilo del componente r a la planta.  
 $Cot_p$ : Costo de desensamblar el producto p.

$Cd_p$ : Costo de descontaminación del producto p.  
 $Cap_v$ : Capacidad en kilogramos de un viaje(vehículo).  
 $Capm_i$ : Capacidad de recepción del mini centro en el nodo i.  
 $Capc_i$ : Capacidad de recepción del centro en el nodo i.

### Variables

$Yc_{ip}$ : Cantidad de kg de residuos de aparatos tipo p que es acopiada por el centro ubicado en el nodo i proveniente por parte de los hogares.  
 $Ym_{ip}$ : Cantidad recibida de RAEE tipo p proveniente por parte de los hogares, si en el nodo i hay un mini punto.  
 $W_i^m$ : Variable binaria que indica si se debe abrir un mini punto el nodo i.  
 $W_i^c$ : Variable binaria que indica si se debe abrir un centro de acopio en el nodo i.  
 $N_{ij}$ : Número de viajes necesarios desde el nodo i hasta el nodo j.  
 $X_{ijp}$ : Cantidad de RAEE del producto p que se envían del nodo i al j.  
 $X_{nijp}^n$ : Cantidad de RAEE del producto p que se envían del nodo i al j sin pasar por un mini punto.  
 $S_{ip}$ : Cantidad de unidades del producto p reaprovechadas en el mercado de segunda mano en el centro i.  
 $T_{ip}$ : Cantidad de kg de RAEE tipo p que serán desensamblados en el centro de acopio i.  
 $D_{ip}$ : Cantidad de kg de residuos del producto p enviados a disposición final en el nodo i.  
 $Z_{ipr}$ : Cantidad en kg del componente r provenientes del producto p enviados a la planta de tratamiento a partir del nodo i.

### Función objetivo

$$\text{Max utilidad: } \left( \sum_{i \in V, p \in P} S_{ip} p v s_p + \sum_{i \in V, p \in P, r \in E} Z_{ipr} p v z_r \right) - \left( \sum_{i \in V} Wm_i Uwm_i + \sum_{i \in V} Wc_i Uwc_i + \sum_{(ij) \in E} N_{ij} Co_{ij} + \sum_{(ij) \in E, p \in P} X_{nijp} CoInd_{ij} + \sum_{i \in V, p \in P} \frac{T_{ip}}{K_p} Cot_p + \sum_{i \in V, p \in P} D_{ip} Cd_p \right) \quad (2)$$

### Restricciones

$$Ym_{ip} = \sum_{j \in V | (i,j) \in E \wedge j \neq |V|} X_{ijp} \quad \forall i \in V, p \in \Pi_i^m: i \neq |V| \quad (3)$$

$$Y_{C_{ip}} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X_{jip} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X^n_{jip} = K_p S_{ip} + T_{ip} \quad \forall i \in V, p \in \Pi^c: i \neq |V| \quad (4)$$

$$Y_{m_{ip}} \leq \theta_{ip} O_p W_i^m \quad \forall i \in V, p \in \Pi_i^m \quad (5)$$

$$Y_{C_{ip}} \leq \theta_{ip} O_p W_i^c \quad \forall i \in V, p \in \Pi^c \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} Y_{m_{ip}} \leq Cap_m W_i^m \quad \forall i \in V \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} Y_{C_{ip}} + \sum_{p \in P, j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X_{jip} + \sum_{p \in P, j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X^n_{jip} \leq Cap_c W_i^c \quad \forall i \in V \quad (8)$$

$$Y_{C_{ip}} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X_{jip} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X^n_{jip} \leq \left( \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E\}} (\theta_{jp} O_p) + (\theta_{ip} O_p) \right) W_i^c \quad \forall i \in V, p \in \Pi^c \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{(i,j) \in E\}} X^n_{ijp} \leq (\theta_{ip} O_p) (1 - W_i^m) \quad \forall i \in V, p \in P: p \in \Pi_i^m \quad (10)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{(i,j) \in E\}} X^n_{ijp} \leq (\theta_{ip} O_p) * W_i^m \quad \forall i \in V, p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{(i,j) \in E\}} X^n_{ijp} \leq \theta_{ip} O_p (1 - W_i^c) \quad \forall i \in V, p \in P \quad (12)$$

$$W_i^m + W_i^c \leq 1 \quad \forall i \in V \quad (13)$$

$$\frac{\sum_{p \in P} X_{ijp}}{Cap_V} \leq N_{ij} \quad \forall (i,j) \in E: j \neq |V| \quad (14)$$

$$\sum_{i \in V: i \neq |V|} (Y_{C_{ip}} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X^n_{jip} + Y_{m_{ip}}) \leq O_p \quad \forall p \in P \quad (15)$$

$$S_{ip} \leq \frac{Y_{C_{ip}} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X_{jip} + \sum_{j \in V \setminus \{(j,i) \in E \setminus \Lambda_j \neq |V| \setminus \Lambda_j \in \Delta_p\}} X^n_{jip}}{K_p} \quad \forall i \in V, p \in P \quad (16)$$

$$\sum_{p \in P} S_{ip} \leq \left( \sum_{p \in P} \alpha_p \frac{(\theta_{ip} + \sum_{i' \in V \setminus \{(i,i') \in E\}} \theta_{i'p}) * O_p}{K_p} \right) W_i^c \quad \forall i \in V \quad (17)$$

$$T_{ip} = D_{ip} + \sum_{r \in \xi_p} Z_{ipr} \quad \forall i \in V, p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} T_{ip} \leq \left( \left( \sum_{p \in P} \theta_{ip} + \sum_{i' \in V \setminus \{(i,i') \in E\}} \theta_{i'p} \right) * O_p \right) W_i^c \quad \forall i \in V \quad (19)$$

$$D_{ip} = d_p T_{ip} \quad \forall i \in V, p \in P \quad (20)$$

$$Z_{ipr} \leq \beta_{rp} T_{ip} \quad \forall i \in V, p \in P, r \in \xi_p \quad (21)$$

$$\frac{\sum_{p \in P, r \in \xi_p} Z_{ipr}}{Cap_V} \leq N_{i|V|} \quad \forall (i, |V|) \in E \quad (22)$$

$$W_{|V|}^c = 0 \quad (23)$$

$$Y_{C_{ip}}, Y_{m_{ip}} \geq 0 \quad \forall i \in V, p \in P \quad (24)$$

$$W_i^m, W_i^c \in \{0,1\} \quad \forall i \in V \quad (25)$$

$$N_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in V, p \in P: (i,j) \in E \quad (26)$$

$$X_{ijp}, X^n_{ijp} \geq 0 \quad \forall i, j \in V, p \in P \quad (27)$$

$$S_{ip} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in V, p \in P \quad (28)$$

$$T_{ip}, D_{ip} \geq 0 \quad \forall i, j \in V, p \in P \quad (29)$$

$$Z_{ipr} \geq 0 \quad \forall i, j \in V, p \in P, r \in \xi_p \quad (30)$$

La función objetivo (ec. 2) maximiza la utilidad total de la red logística durante un periodo de tiempo establecido. La expresión de la función se divide en 8 términos, el primero representa los ingresos totales de enviar aparatos al mercado de segunda mano y el segundo representa los ingresos totales de enviar residuos a la planta de tratamiento; posterior a estos, se encuentran los costos, los dos primeros hacen referencia a los costos de apertura y operación de mini centros y centros, seguido de costos de viajes directos, costos de viajes indirectos incurridos en la red, costo de desensamble de producto y por último el costo asociado al desecho de RAEE.

La restricción (ec. 3) establece el balance de flujo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en los mini centros de acopio. La cantidad de RAEE que es acopiada por el mini centro proveniente de los hogares ( $Y_{m_{ip}}$ ), debe ser la misma cantidad de residuos del producto que se envía a

los centros de acopio ( $\sum_{j \in V|(i,j) \in E \wedge j \neq |V|} X_{ijp}$ ). La Fig.2 representa los flujos en los mini centros de acopio.

La ecuación (4) garantiza el flujo de residuos en los centros de acopio. Los residuos provenientes directamente de los hogares ( $Y_{cip}$ ) y los residuos mandados por los mini centros de forma directa ( $\sum_{j \in V|(j,i) \in E \wedge j \neq |V| \wedge j \in \Delta_p} X_{jip}$ ) e indirecta ( $\sum_{j \in V|(j,i) \in E \wedge j \neq |V| \wedge j \notin \Delta_p} X^n_{jip}$ ) a cada centro, deben ser igual a las cantidades de aparatos enviados a segunda mano ( $K_p S_{ip}$ ) más los kilogramos de cada aparato que serán desensamblados ( $T_{ip}$ ) en cada centro de acopio.

Posteriormente los aparatos que sean desensamblados, una parte son enviados a la planta de tratamiento para ser aprovechados y otro porcentaje es desechado o enviado a disposición final como lo representa la ec. (18).

Este tratamiento se realiza siempre y cuando se disponga de un centro de acopio en el nodo  $i$  como lo expresa la ec. (19). Los porcentajes que son mandados tanto para tratamiento, como para desecho están establecidos en las ec. (20)-(21). Los flujos que se mueven en los centros de acopio se reflejan en la Fig. 3.

Las restricciones (ec. 5) y (ec. 6) limitan la capacidad máxima en kilogramos de cada tipo de RAEE provenientes de los hogares que es atribuida a los mini centros y centros respectivamente. La ec. (7) delimita la cantidad de RAEE que pueden recibir el mini centro de acopio a partir de la capacidad establecida que tiene cada uno de estos nodos. De igual forma la restricción (ec. 8) permite determinar la cantidad total de RAEE que puede recepcionar cada centro de acopio, teniendo en cuenta que estos reciben residuos provenientes de los hogares y de los mini centros de forma directa o indirecta. En la ec. (9) determina la cantidad máxima de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos atribuida a los centros de acopio. Eventualmente estas ecuaciones se activan dependiendo del tipo de instalación que se abre en cada nodo.

Las ec. (10)-(12) actúa sincronizadamente, ya que permiten modelar el movimiento de residuos de forma indirecta que se genera en la red, cuando los mini centros que se abren no aceptan determinado tipo de RAEE y se ven en la obligación de mandar a un centro de acopio dicha oferta.

La ec. (10), prohíbe el envío de forma indirecta de los RAEE que son aceptados por los mini centros, siempre y cuando estos abran, los residuos que no sean aceptados

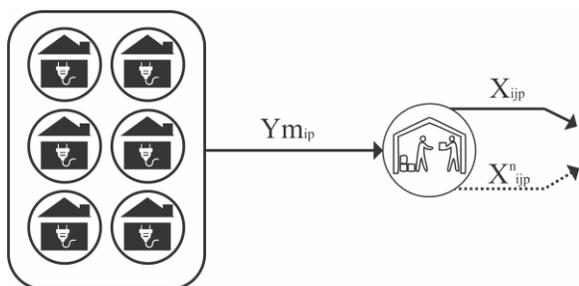


Fig. 2. Flujo de RAEE en los mini centros de acopio

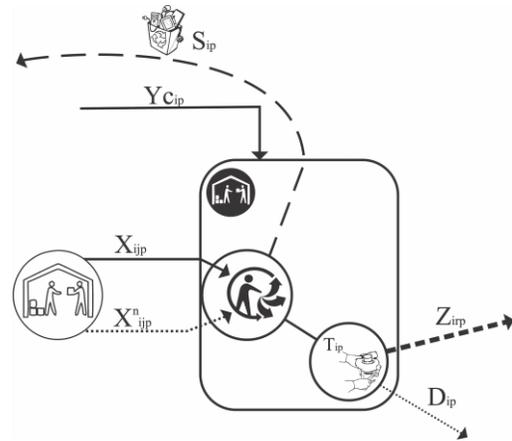


Fig. 3. Flujo de RAEE en los centros de acopio.

deben ser enviados a un centro de forma indirecta y la ec. (11) limita dicha cantidad a enviar.

Por último, la ec. (12) prohíbe este flujo indirecto de todos los residuos en caso de que haya apertura de centro. Estas tres ecuaciones funcionan gracias a que la ec. (13) permite establecer la apertura de una o ninguna clase de instalación por nodo.

La restricción (ec. 14) establece la medición del número de viajes realizados entre mini centros y centros de acopio de forma directa, teniendo en cuenta la capacidad que posee el vehículo. La ec. (15) permite que la distribución de los residuos en la red obedezca a la oferta existente de cada uno de los aparatos tratados.

Las cantidades de residuos que son enviados al mercado de segunda mano son limitadas por la ec. (16) la cual considera una fracción aprovechable del total de residuos que se encuentra en los centros de acopio. La ec. (17) permite que el flujo de segunda mano sea enviado solo si es abierto un centro de acopio en el nodo  $i$ .

La restricción (ec. 22) permite la medición del número de viajes entre los centros de acopio y la planta de tratamiento, teniendo en consideración la capacidad de carga que tiene el vehículo. La ec. (23) nos garantiza que la fábrica siempre este abierta y que no funcione como un centro de acopio. Finalmente, en las ec. (24)-(30) se establecen los dominios de cada una de las variables.

## V. EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES

Los resultados del modelo (2)-(30), se obtuvieron utilizando el lenguaje de modelado algebraico AMPL con el solucionador GUROBI. Para realizar los experimentos computacionales se utilizó una computadora con un procesador Intel (R) Celeron(R) CPU N3060 1.60GHz con 4GB de RAM y sistema operativo doméstico Microsoft Windows 10 Pro. Todos los resultados fueron obtenidos sin aproximaciones, para esto se utilizó el comando option display\_round 0 en la programación. Nunca fue limitado el tiempo experimental.

A. Generación de la instancia base

Para validar la modelación propuesta, se propuso primeramente una instancia base, con fines netamente ilustrativos que permitió verificar el correcto funcionamiento de cada una de las ecuaciones, para esta instancia, se tomaron 9 municipios del departamento como posibles nodos de la red, estos fueron escogidos al azar. A partir de la elección de los nodos, se realizó la matriz de adyacencia, verificando la existencia de vías que unieran a los dos nodos, ignorando completamente los demás municipios que no fueron seleccionados para esta instancia; cabe resaltar que en la matriz se estableció que todos los nodos podían llegar directamente a la planta ubicada en el nodo correspondiente al municipio de Montería.

De la lista de aparatos eléctricos y electrónicos seleccionados para el proyecto, solo se tomaron 3 de ellos (teléfono celular, televisores plasma y computador de escritorio), para cada uno de ellos se trabajó con los componentes expuestos en la tabla I (Ver tabla I).

Como se había explicado en el apartado anterior, los centros de acopio reciben todos los RAEE, pero los mini centros no, por lo cual, los RAEE que iba a recibir cada una de estas instalaciones fueron escogidos aleatoriamente.

En cuanto a la obtención de los parámetros necesarios para validar el modelo, la oferta fue calculada con el método de estimación por consumo y uso de los aparatos, explicado en la sección III, con la salvedad de que se utilizó el número de hogares correspondiente a la suma de los 9 municipios seleccionados, por lo cual se obtuvo una oferta de 52309.4819 Kg para teléfonos celulares, 491254.2648 Kg de televisores plasma y 1561096.886 Kg de computadores de escritorio.

La fracción de la oferta atribuida a cada nodo fue estimada calculando el número de hogares en cada uno de los municipios, para esto se utilizó el cociente entre, las proyecciones de la población de cada municipio de Córdoba para 2019, sacadas de las proyecciones de población municipales por área [21], entre el índice de personas por hogar calculado con la regresión lineal anteriormente descrita. Estos resultados fueron comparados con el total de hogares en estudio, para sacar las fracciones

correspondientes a cada nodo; dado a que no se tenían datos de uso de aparatos por municipio, se asignó por nodo la misma fracción para todos los aparatos.

Otros parámetros como las fracciones aprovechables de los productos, las fracciones de desecho, el porcentaje que representa cada uno de los componentes dentro del aparato, costos de desensamblé, costos de descontaminación y precio de venta de segunda mano fueron estimados mediante la ayuda de expertos; las distancias entre nodos fueron generadas utilizando las API Geocoding y Distance Matrix de Google implementadas en el lenguaje R del servicio de Open Route [24].

Para las capacidades de los centros y mini centros de acopio, se recurrió a fuentes de información secundaria, se contactaron personas en algunos de los municipios, con el fin de encontrar bodegas o almacenes disponibles para operar y conocer las dimensiones y precios, de igual forma, se realizaron búsquedas en inmobiliarias.

Para los costos de apertura y operación, se realizó un pequeño estudio financiero para cada uno de los nodos, en donde se tuvo en cuenta costos por servicios públicos, remuneración del personal administrativo, gastos de depreciación, costo de terreno, de máquinas, equipos, mueble y enseres. En cuanto al costo de viaje, se calculó el costo por kilómetro (Km) recorrido, teniendo en cuenta el vehículo que fue seleccionado y se multiplico por cada una de las distancias, a esto se le adicione un costo estándar por peaje y un precio base. Para el costo de viajes indirectos, se tomó la decisión que fuera por kilogramo de RAEE enviado y corresponde al doble del costo de viaje normal.

Por último, el precio de venta de un kilogramo (1 Kg) del componente a la planta de tratamiento, fue consultado con un grupo de expertos que colaboraron a lo largo de este proyecto.

La fig. 4, muestra la distribución espacial de los nodos involucrados en la instancia base.

TABLA I

COMPONENTES SELECCIONADOS	
Aparatos eléctricos y electrónicos	Componentes
Teléfono celular	Pantalla, marcos, cámara, tarjetas, bocina, micrófono, pines, otros <sup>a</sup>
TV lcd, plasma o led	Reflector y fuente de luz, tarjeta madre, cristal frontal, fuente de alimentación, bocina integrada, carcasa y soporte, otros <sup>a</sup> .
Computador de escritorio	Gabinete, fuente de alimentación, mother board, microprocesador, tarjeta RAM, disco duro, unidades CD-R, tarjeta de video, tarjeta de sonido, esféricos, otros <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Hace referencia al resto de componentes que completan el 100% del aparato.

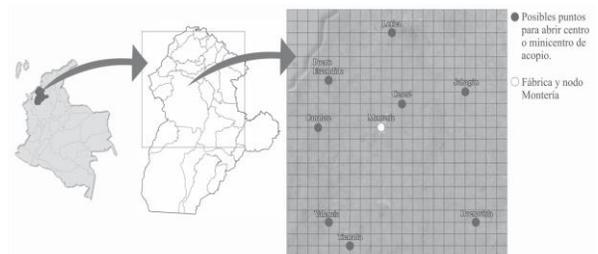


Fig. 4. Localización espacial de los nodos seleccionados para la instancia base.

## VI. RESULTADOS

Al resolver la instancia propuesta, los resultados muestran que es conveniente instalar 2 mini centros, uno en el nodo perteneciente al municipio de Valencia y otro en Canalete, los cuales solo reciben televisores y celulares respectivamente. Valencia envía directamente su fracción de residuos de televisores al centro de acopio del municipio de Tierralta, al igual que envía indirectamente la fracción de televisores y teléfonos celulares generada en ese nodo, que no puede almacenar. Situación similar pasa con el mini centro de Canalete, con excepción de que este, manda al centro de acopio abierto en Puerto Escondido.

Con esta instancia, la oferta disponible de los 3 aparatos seleccionados fue recogida en su totalidad, puesto que, los centros y mini centros contaban con capacidades considerables, moviendo de esta forma 1980026Kg de RAEE de forma directa y 122929Kg de forma indirecta. Todos los centros enviaron al mercado de segunda mano los tres tipos de aparatos, la red mando 29290 teléfonos celulares, 10641 computadores de escritorio y 8812 televisores a segunda mano. En total, en la red se desecharon 268260 Kg de RAEE y 1773412 Kg fueron enviados a desensamble.

Con estos resultados, se realizaron en total 1534 viajes y se obtuvo una utilidad máxima de \$38.307.760.060<sup>a</sup>.

La tabla II, especifica los ingresos y costos obtenidos, al igual que la Fig. 5 ilustra las decisiones de apertura tomadas. Los demás resultados de flujos y decisiones se encuentran ilustradas en las fig. (6)-(10) en la sección de Apéndice.

### A. Generación de instancias y experimentos con otros escenarios.

Para observar y analizar el comportamiento de modelo en la representación y solución de otros escenarios que pudieran presentarse en la red propuesta. Se realizaron una serie de instancias variando los parámetros a partir de los datos obtenidos, la tabla III presenta la variación de la utilidad, ingresos y costos obtenidos.

TABLA II

INGRESOS Y COSTOS DE LA INSTANCIA BASE	
Descripción	Monto
Ingreso de segunda mano.	\$ 13.241.300.000
Ingreso por ventas de componentes.	\$ 33.687.718.486
Costos de operación y apertura de centros.	\$ 490.077.417
Costos de operación y apertura de mini centros.	\$ 39.551.818
Costo viaje directo.	\$ 203.939.321
Costo de viaje indirecto.	\$ 44.908.466
Costo de desensamble.	\$ 4.209.908.510
Costos de desechar.	\$ 3.632.872.895

<sup>a</sup> Todas las cantidades monetarias de este artículo se encuentran expresadas en millones de pesos colombianos.

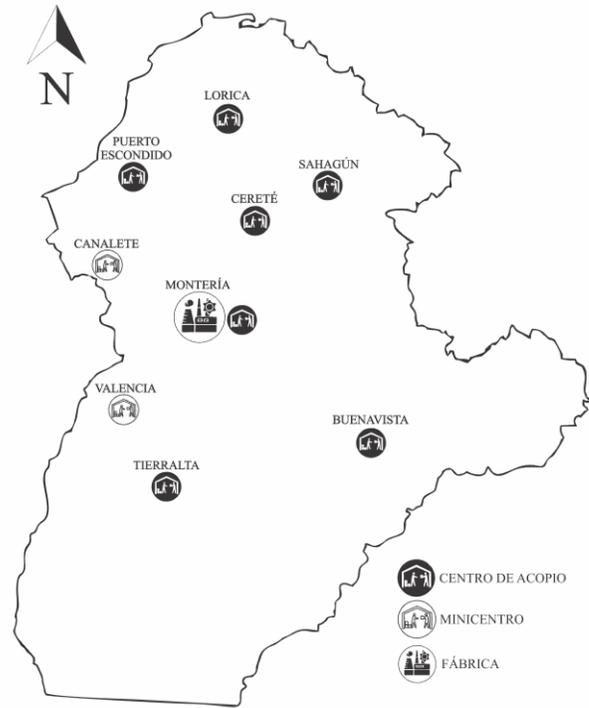


Fig. 5. Localización de los centros y mini centros en la instancia base.

Se puede notar que evidentemente las utilidades de la red van en función de la cantidad de RAEE que se muevan en esta, al igual que la estimulación de la apertura de mini centros, puesto que, entre menos kilogramos de oferta existan, se tiende a la apertura de más mini centros, para bajar los costos por apertura y operación de centros y así poder tener una red rentable como se puede evidenciar en la primera instancia.

Con los parámetros establecidos, pero con aumentos en la oferta como en la instancia 2, aunque no es recogida en su totalidad, hay aumentos en la utilidad, reflejados por el aumento de los ingresos que logra compensar el alza de los costos.

En las instancias 3 y 4, podemos notar que aumentos o disminuciones del 50% en costos de apertura de mini centros, generan cambios en la utilidad de menos del 1%. De igual forma, aumentos en las capacidades, ya sea de centros o mini centros, como se muestra en las instancias 14 y 15 aunque mejora la utilidad, este aumento es menor al 1% dado a que, con las capacidades que se tienen como base se cubre la oferta disponible en un 100%. Con las cantidades de RAEE que se manejan en la instancia base y cambios en la capacidad de los vehículos utilizados, también se perciben cambios de aproximadamente el 1% en la utilidad (instancias 10 y 11).

Como se refleja en las instancias 5,6 y 7, los precios de venta de componentes a la planta generan uno de los mayores ingresos de la red, por ende, aumentos en estos, generan alzas en la utilidad y disminuciones causan el efecto contrario.

TABLA III

Instancia	Cambio	Utilidad	RESUMEN DE INSTANCIAS							
			Ingreso segunda mano	Ingreso ventas de componentes	Costos apertura y operación centros	Costos de apertura y operación mini centros	Costo viaje directo	Costo viaje indirecto	Costo por desensamblar <sup>a</sup>	Costos por desechar <sup>a</sup>
1	Disminuye 50% la oferta de los aparatos.	18.974	6.626	16.846	288	116	76	92	2.106	1.817
2	Aumenta 50% la oferta de los aparatos.	51.497	15.884	46.452	554	19	294	27	5.251	4.692
3	Aumenta 50% los costos de apertura de mini centros.	38.287	13.241	33.687	490	59	204	44	4.209	3.632
4	Disminuye 50% los costos de apertura de mini centros.	38.327	13.241	33.687	490	19	203	44	4.209	3.632
5	Aumentan un 50% los precios de vender un componente a la planta.	57.461	7.919	58.927	490	39	229	44	4.421	4.158
6	Disminuye un 50% los precios de vender un componente a la planta.	21.447	13.241	16.827	490	39	203	44	4.209	3.632
7	Los precios de vender un componente a la planta son iguales (promedio).	20.727	13.249	16.100	490	39	203	44	4.212	3.631
8	Se reduce el costo de desensamblar un 50%.	40.412	13.241	33.688	490	39	203	44	2.105	3.633
9	Aumenta el costo de desensamblar un 50%.	36.201	13.238	33.686	490	39	203	44	6.313	3.632
10	Vehículo con un 50% más de capacidad.	38.389	13.239	33.687	490	39	136	29	4.209	3.632
11	Vehículo con un 50% menos de capacidad.	38.076	13.240	33.688	609	0	400	0	4.209	3.632
12	Ofertas iguales para todos los aparatos (se toma la menor).	3.145	4.16	1.588	288	116	15	7	1.968	209
13	Se utilizan centros de acopio con un 50% más de capacidad.	38.383	13.255	33.691	352	94	195	72	4.213	3.634
14	Se utilizan centro y mini centros de acopio sin capacidad limitada.	38.384	13.256	33.691	352	94	195	72	4.213	3.634
15	Aumento del 50% en los costos de viaje.	38.183	13.241	33.687	490	39	306	67	4.209	3.632
16	Todos los nodos se encuentran conectados entre sí.	38.343	13.243	33.686	303	114	241	85	4.210	3.632
17	Disminuye 50% el precio de venta de segunda mano.	33.900	3.960	39.327	490	39	230	44	4.422	4.159
18	Capacidad sin límite, costo de apertura de centros y mini centros aumentan un 50%	38.212	13.256	33.691	432	116	151	185	4.213	3.634
19	Aumento del 50% de la fracción aprovechable en el mercado de segunda mano.	42.682	20.039	30.501	490	39	184	44	3.817	3.282

En cuanto a los ingresos por segunda mano, aunque la disminución de su precio (instancia 17) genera pérdida de utilidad, no es tan significativa como la pérdida obtenida con la disminución de los ingresos por venta de componentes; de igual forma, aumentos en la fracción destinada al mercado de segunda mano (instancia 19), mejoran la utilidad, pero no de la misma forma que lo hace la venta de componente, con lo que se deduce que las ventas por componentes y el precio que se maneje aportan económicamente en gran medida a la red. Por otro lado, los costos de desensamble, como se puede observar en las instancias 8 y 9 hacen variar alrededor de un 5% la utilidad de la red al aumentar o disminuir su valor en un 50%; el cual es un margen que puede ser manejado para no generar pérdidas significativas. Por último, se puede notar que, aunque los costos por viajes aumenten (instancias 15) la disminución de la utilidad es menor al 1%, lo cual deja ver que los costos que se causan por transporte no están ocasionando un valor característico en la red, situación que se puede ratificar en la instancia 16, en donde al unir todos los nodos de la red entre sí y aumentar costos de viajes, la utilidad tiende al aumento, pero en un porcentaje menor al 1.

En promedio, los resultados de todas las instancias fueron obtenidos en tiempos inferiores a los 5 minutos y con un gap promedio de 0.0057%.

## VII. DISCUSIÓN

El Modelo favorece la apertura de centros de acopio, puesto que, es en estos donde se generan la mayoría de las actividades de la red. Sin embargo, estimula la apertura de algunos mini centros para minimizar los costos de apertura y operación. Con la apertura de estos dos mini centros y los costos de viajes directos e indirectos que estos generan, se obtiene un costo menor, que el obtenido si se abrieran centros de acopio en todos los nodos. Cabe resaltar que esto sucede al ser los nodos de Valencia y Tierralta los mini centros con menor capacidad y por ende menor costo de apertura y operación.

De igual forma, el modelo envía en la mayoría de los centros, el total de las fracciones asignadas para segunda mano. Esto se realiza para contrarrestar los costos que se generan en el desensamble y desecho de los kilogramos de RAEE mandados a tratamiento. Si se enviara todo a tratamiento se reduciría la utilidad en aproximadamente un 16% e incluso no se utilizaría todo el 100% de la oferta disponible. Lo anterior es causado porque, mientras que los costos de desensamble y desechos se generan por producto, los ingresos obtenidos por la venta de los componentes se generan por kilogramo de RAEE, ya que, son vendidos por lo general a empresas que compran en grandes volúmenes.

Sin embargo, aumentos significativos de aproximadamente un 50% en los precios de venta de los componentes o disminuciones en los costos, generarían una mayor diferencia y por ende una mejor utilidad. Por otra parte, la utilidad se ve favorecida, al no incurrir en costos de transporte entre el centro de acopio de Montería (donde se

encuentra la mayor parte de la oferta) y la planta de tratamiento.

Además, cabe resaltar que algunos costos inmersos en la logística inversa de estos residuos no fueron tenidos en cuenta y que el modelo no fue restringido respecto al presupuesto, no obstante, al realizar la corrida de las 19 instancias, donde se variaron diferentes parámetros, se pudo evidenciar que siempre se obtienen buenos márgenes de ganancia con un promedio de aproximadamente \$35.317.862.687 de utilidades; donde los costos totales representan en promedio el 27%.

Estas cifras confirman lo encontrado en otros trabajos tales como Grisales, D & Rave, A. (2019.) [13] y (Morales et al, 2019) [14] en donde se estableció que existe una alta utilidad en la implementación de un diseño de red logística para los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Las soluciones óptimas de los diferentes escenarios son coherentes con otros resultados de la literatura. En el caso de la investigación de Calpa, J. (2020) [12] la simulación de diferentes escenarios demostró que la implementación de un diseño de logística inversa para los RAEE puede optimizar la recuperación de dichos residuos y recuperar parte del valor de los mismos, lo cual es ratificado por los resultados de la presente investigación.

## VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este artículo presentó un primer acercamiento al diseño de una red de logística inversa, para el transporte y el tratamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. El trabajo es el primero en su tipo en estudiar la oferta de RAEE con datos del departamento de Córdoba, Colombia. Se propuso un modelo integrado de programación lineal entera mixta para representar matemáticamente la red propuesta. Un diferencial del modelo con relación a otros en la literatura es la unificación de las decisiones de localización y transporte en un modelo integrado de logística inversa para los RAEE.

El modelo fue probado en diferentes instancias, para observar las variaciones presentadas en la utilidad generada por la red. Los resultados mostraron que el modelo representa la red logística propuesta y que también es flexible para representar diferentes variaciones en los parámetros con el fin de simular escenarios reales. En cuanto al rendimiento computacional, se observó que el modelo arroja buenas soluciones en tiempos razonables.

Los datos de oferta obtenidos en esta investigación y las utilidades simuladas mediante el modelo matemático indican que en el departamento de Córdoba se está desaprovechando un potencial económico nada despreciable. Esto evidencia también indicios de la viabilidad para la implementación de este tipo de redes como una solución factible para tratar de afrontar el problema actual que se tiene con el inadecuado manejo de este tipo de residuos sólidos, de igual forma, demuestra el potencial de negocios basados en el aprovechamiento de los RAEE a nivel regional.

La experiencia indica que la posibilidad de obtener beneficios económicos de los materiales que se pueden recuperar de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos es cada vez más alta, pues, para 2016 se estimó que el valor total de todas las materias primas presentes en los desechos electrónicos fue aproximadamente 55 mil millones de euros, que fue más que el producto interno bruto de ese mismo año de la mayoría de los países del mundo [3].

Dado el nivel jerárquico de las decisiones representadas en la red, una limitación del modelo propuesto en este trabajo, puede ser la no inclusión de algunos costos y decisiones logísticas. Por ejemplo, costos variables por toneladas de residuos no aprovechables, costos por inventarios o costos de clasificación; parámetros que han sido incluidos en otras investigaciones como la de Burgos Meneses *et al*, (2017) [6] y Monroy & Poveda (2017) [16]. La integración de estos costos y de las decisiones relacionadas puede ser una extensión interesante para el desarrollo de futuras investigaciones.

Como trabajo futuro, se podría implementar una versión multiperíodo del modelo para simular el despliegue táctico de las operaciones de la red e integrar decisiones como la determinación de niveles de inventario o implementación de floja heterogénea. Todo lo anterior acompañado con la generación de instancias de mayor tamaño, donde existan varias plantas de aprovechamiento y sus respectivos costos logísticos agregados al modelo de la red.

Otro enfoque interesante sería la posibilidad de realizar trabajos de carácter más gerenciales como estudios de factibilidad para la implantación de estas redes logísticas.

## REFERENCIAS

- [1] Markus, K. and Gerhardt, S. "The global market for consumer electronics continues grow," Growth from Knowledge, Alemania, 2019. Recuperado de <https://www.gfk.com/insights/press-release/the-global-market-for-consumer-electronics-continues-to-grow/>
- [2] EcoComputo. Consulta el Reporte de la Generación de Residuos Eléctricos y Electrónicos en el planeta. 2018. Recuperado de <http://ecocomputo.com/noticias/consulta-el-reporte-de-la-generacion-de-residuos-el-ctricos-y-electr-nicos-en-el-planeta>
- [3] Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. : The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Geneva, Bonn, Vienna, 2017.
- [4] Casas, J.; Ceron, K. ;Vidal, C.; Peña,C.;Osorio, J; 2015. "Priorización Multicriterio de Un Residuo de Aparato Eléctrico y Electrónico." Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte, Vol 33, no. 2, pp. 172-197,2015.
- [5] Noble-Ramos, V. "Análise da aplicação de modelos lineares de otimização em tamanho real e resolução de problemas sequência de produção de bebidas," Tesis inédita de maestría, Universidad Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, Brasil,2017.
- [6] Burgos-Meneses, J.; Vitor-Toso, D. and Ferreira, D. "Modelo Para O Planejamento Da Rede De Logística Reversa De Pneus Inservíveis No Brasil",2017.
- [7] Suárez, M.; Tarazona, J.; and Triviño, P. "Diseño de un modelo de logística inversa para los RAEE tipo 3." 2do Congreso Internacional En Administración de Negocios Internacionales. Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, 2017.
- [8] Ghezavati, V., & Nia, N. S. (2015). Development of an optimization model for product returns using genetic algorithms and simulated annealing. *Soft Computing*, 19(11), 3055–3069. <https://doi.org/10.1007/s00500-014-1465-8>
- [9] Qin, X. (2011). Diseño de una red de logística inversa que pertenece a una clase de problemas NP difíciles, un algoritmo genético combinado. 5, 3205–3208.
- [10] Quintero Ortega, S. (2016). Diseño de un modelo de gestión de residuos tecnológicos, aplicando logística inversa. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
- [11] Contreras Castañeda, E., Fraile Benítez, A., & Silva Rodríguez, J. (2013). Diseño de un sistema de logística inversa para la recolección de envases y empaques vacíos de plaguicidas. *Revista Ingeniería Industrial*.
- [12] Calpa-Oliva, J. (2020). Validación de un modelo de logística inversa para la recuperación de los RAEE de la ciudad de Cali, basado en el Pensamiento Sistemático usando una simulación con Dinámica de Sistemas. *Tecnológicas*, 23(48), 55–81. <https://doi.org/10.22430/22565337.1418>
- [13] Grisales-Cardona, D., & Rave-Hoyos, A. "Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (raee) en la empresa renting colombia s.a.s." Tesis, Universidad EIA, Antioquia, Colombia, 2019.
- [14] Morales-Contreras, J. R., Caballero- Morales, S. O., Cano- Olivios, P., & Sánchez- Partida, D. (2019). Propuesta de red de distribución para reciclaje de desechos eléctricos y electrónicos. *Research in Computing Science*, 148(8), 487–498. <https://doi.org/10.13053/rcs-148-8-37>
- [15] Serrano A. "Análisis metaheurístico en la logística inversa de residuos" Tesis inédita de doctorado, Universidad de Málaga, Málaga, España. 2015.
- [16] Monroy, M. C., & Poveda, M. V. "Propuesta de localización geográfica de un centro de acopio zonal para la selección y clasificación de residuos sólidos en las localidades Santa Fe y La Candelaria."
- [17] Cauchick, P.A.; Fleury, A.; Pereira, C.H.; Noboru, D.; Pinheiro, E.; Batista, J.; ... Miranda, V.M. "Elsevier Metodologia de Pesquisa Para Engenharia de Produção e Gestão de Operações." Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.
- [18] DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística. "Encuesta Calidad de Vida," 2008-2018. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/calidad-de-vida-ecv>
- [19] Blaser, F.; Empa, "Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia Diagnóstico de Electrodomésticos y de Aparatos Electrónicos de Consumo," Colombia, 2009.
- [20] Schlueder, M.; Müller, E.; Rochat, D. "e-Waste Assessment Methodology Training & Reference Manual." 2012. Disponible en: <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-EWASTE-MANUA-EwasteAssessmentMethodology.English.pdf>
- [21] DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística. "Colombia. proyecciones de población municipales y departamentales por área," 2005-2020. Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla\\_06\\_20/ProyeccionMunicipios2005\\_2020.xls](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla_06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls)
- [22] Corporación autónoma regional del centro de Antioquia (Corantioquia). "buenas prácticas ambientales en el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos – raee," 2010. recuperado de: <http://www.corantioquia.gov.co/siteassets/pdf/gesti%3%b3n%20ambiental/residuos/peligrosos/cartillas/cartiila%20raee.pdf>
- [23] DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística. "Indicadores básicos de tenencia y uso de tecnologías de la información y comunicación – TIC en hogares y personas de 5 y más años de edad," 2017. Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/tic/bol\\_tic\\_hogares\\_2017\\_v2.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/tic/bol_tic_hogares_2017_v2.pdf)
- [24] LLC, G. (n.d.). *Google Maps Platform / Google Developers*. Retrieved January 26, 2021, from <https://developers.google.com/maps/documentation>. 2021

Este estudio fue financiado por los autores. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Copyright © 2023 Daniela Galván, Yesit Mendez, Victor Noble Ramos



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales.

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumendelicencia - Textocompletodelalicencia](#)

APENDÍCE I

A continuación, se visualiza los resultados del modelo en donde se ilustra la localización de mini centros, centros de acopio, así como las cantidades de RAEE y número de viajes realizado en el periodo de un año en la red. De igual forma se ilustra un ejemplo del funcionamiento de los centros de acopio.

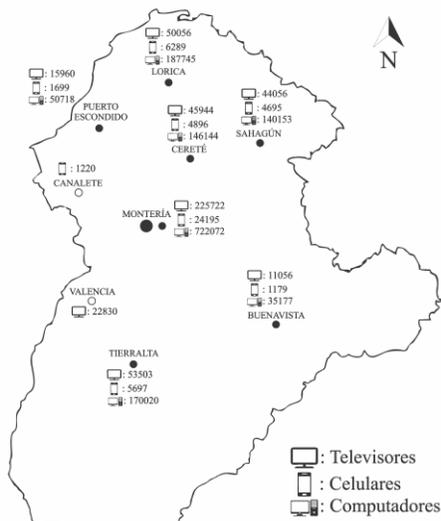


Fig.6. Cantidad de RAEE enviado a cada nodo.



Fig.7. Envío de RAEE de mini centros a centros de acopio.

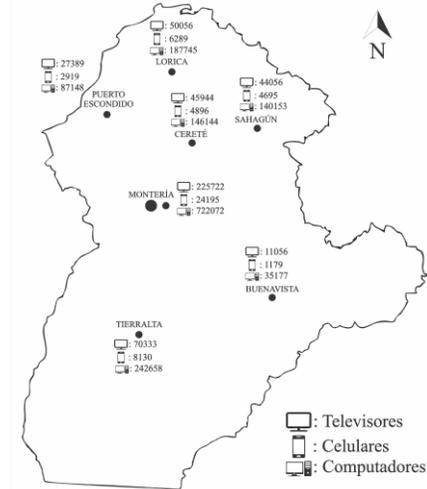


Fig.8. Consolidado de RAEE en cada centro de acopio.



Fig.9. Viajes anuales realizados en la red.

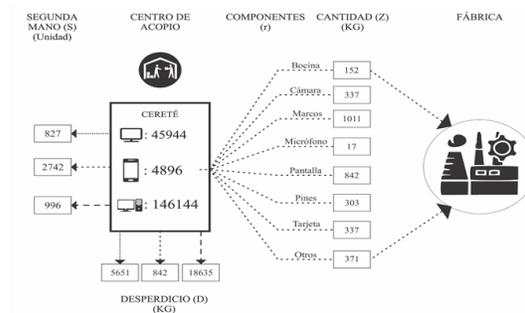


Fig.10. Consolidado de telefonos celulares en el nodo de cerete.