

Estrategia de resolución del problema de ruteo de vehículos aplicado a la recolección y transporte de residuos patológicos generados en establecimientos de salud

Tomás Mufarrege¹, Vicente Martín Galíndez¹,
Luis J. Zeballos^{1,2}, Marian G. Marcovecchio^{1,3}

¹ Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral.

² INTEC, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, CONICET-UNL.

³ INGAR, Instituto de Desarrollo y Diseño, CONICET-UTN.

Santa Fe, Argentina

tomasmufarrege@gmail.com; vicentemartingal@gmail.com;
zeballos@intec.unl.edu.ar; mariangm@santafe-conicet.gov.ar

Resumen. Las principales actividades vinculadas a la logística de la gestión de residuos patológicos son las operaciones seguras de recolección, transporte y descarga en los sitios de tratamiento de estos materiales. La coordinación de los tiempos de estas operaciones es esencial para evitar la proliferación de enfermedades entre el personal de salud, los trabajadores encargados de la gestión y la comunidad en general. La coordinación de las diferentes actividades involucradas resulta en un problema complejo de toma de decisiones, más aún si se considera el comportamiento estocástico de la generación de residuos patológicos. En este contexto, el trabajo presenta un modelo matemático mixto entero lineal basado en el concepto de robustez ligera y una estrategia de resolución computacionalmente eficiente para el problema de operación regular de recolección y transporte hasta su lugar de tratamiento de residuos patológicos generados en establecimientos de salud, como hospitales y sanatorios. El problema consiste en un problema de ruteo de vehículos del tipo capacitado y con viajes múltiples. Los problemas de ruteo de vehículos son caracterizados como NP-hard de optimización combinatoria. Por lo tanto, los resolvers comúnmente usados para resolver problemas de Programación Matemática Enteros, usualmente fallan en encontrar una solución óptima en un tiempo de ejecución razonable. De aquí la necesidad de implementar alguna técnica particular que permita resolver el problema en tiempo eficiente. En el trabajo se aborda un caso real tomado de la literatura y se detalla la metodología de resolución propuesta.

1 Introducción

Durante la pandemia de Covid-19, la gestión de residuos patológicos generados en establecimientos de salud resultó ser un problema crítico. Los desechos patológicos generados en instituciones como hospitales y clínicas necesitan un tratamiento diferen-

ciado, debido a los peligros que presentan dada la variedad de su composición, pudiendo tener elementos cortopunzantes, residuos infectocontagiosos, y otros factores de riesgo. Es por esto que existe legislación nacional y local, que impone normas y procedimientos específicos para su manejo y tratamiento seguro, tanto para los establecimientos generadores de estos residuos como para la habilitación y funcionamiento de empresas dedicadas a brindar el servicio de recolección y disposición final de los mismos.

En los últimos años, la cantidad de residuos patológicos generados ha tenido un crecimiento continuo, debido al aumento del número de instituciones de salud y de la población. Pero la situación de pandemia causada por la propagación del virus SARS-CoV-2 ha incrementado drásticamente la cantidad de enfermos hospitalizados y por ende, la cantidad de residuos patológicos generados en establecimientos de salud, que necesitan ser tratados bajo estrictas normas de seguridad para evitar mayor propagación del virus.

Las principales actividades vinculadas a la logística de la gestión de residuos patológicos son las operaciones seguras de recolección, transporte y descarga en los sitios de tratamiento de estos materiales. La coordinación de los tiempos de estas operaciones es esencial para evitar la proliferación de enfermedades entre el personal de salud, los trabajadores encargados de la gestión y la comunidad en general.

En este contexto, se propone abordar desde la programación matemática el problema de recolección y transporte hasta su lugar de tratamiento de residuos patológicos generados en establecimientos de salud, como hospitales y sanatorios. Un abordaje riguroso de la logística de este problema significaría por un lado beneficios económicos para la empresa o ente encargado de la recolección y transporte de los residuos patológicos, y por el otro, brindaría condiciones óptimas desde el punto de vista ambiental y sanitario, minimizando los tiempos de espera para la recolección y eliminación de los residuos.

El problema de programación matemática que se desea abordar se trata de un problema particular de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem), con restricciones específicas del caso. El problema de ruteo de vehículos ha sido y continúa siendo ampliamente estudiado. Un panorama global sobre el estado del arte de los avances y aportes hechos en el VRP y sus variantes puede encontrarse en trabajos como [1], [2], [3] y [4].

En la literatura, también existen varios trabajos abordando el problema de recolección y transporte de residuos patológicos. Alshraideh y colab [5] abordaron este problema para un área integrada por 4 distritos en el Norte de Jordania, que es cubierta por dos camiones que hacen la recolección y transporte hasta un incinerador.

He y colab. [6] resumen los problemas existentes en el proceso de recolección de desechos médicos en China y propone métodos para diseñar y optimizar la red de recolección que pueden ayudar a reducir el costo y los riesgos de transporte, disminuyendo la distancia total de viaje. En este trabajo se tienen que cuenta las regulaciones de ese país y las políticas de reciclaje de desechos médicos en China, que indican que los desechos médicos deben recuperarse por completo dentro de las 48 horas. Esto da alternativas de visita a cada establecimiento diarias o cada dos días, de acuerdo a la cantidad de residuos generados.

Baran [7] propone un modelo multiobjetivo para el problema de generar las rutas para los vehículos de recolección: minimizar la distancia total de transporte y minimizar la velocidad media por hora. Los objetivos del problema se combinan mediante métodos de escalarización. Aplican el modelo propuesto para determinar los recorridos para la recolección de los desechos médicos de los 6 hospitales de Eskişehir, Turquía, que son realizados por un único vehículo que los lleva al depósito para reciclado.

Mantzaras y Voudrias [8] desarrollan un modelo conceptual para optimizar el diseño de un sistema de recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición de residuos médicos infecciosos. Consideran nodos de producción (establecimientos generadores), nodos intermedios (estaciones de transferencia), nodos intermedios obligatorios de instalaciones de tratamiento y finalmente nodos terminales (vertederos). El modelo calcula las ubicaciones óptimas de todas las instalaciones y sus capacidades; el número y capacidades de todos los vehículos de recolección, transporte y transferencia de residuos y su ruta de transporte óptima; y el costo óptimo del sistema de gestión del desecho médico infeccioso. El modelo se aplica a la región de Macedonia Oriental y Tracia, Grecia.

Eren y Tuzkaya [9] proponen un modelo para la gestión de residuos médicos generados por instituciones de salud, en donde se define una escala de puntuación de seguridad para medir los riesgos relacionados con la salud humana y el medio ambiente en el manejo de desechos médicos. Luego, mediante el proceso de jerarquía analítica, establecen una estructura jerárquica con ponderación de los criterios. La metodología propuesta se aplica a los hospitales de la región de Estambul, Turquía.

Taslimi y colab. [10] proponen un problema de ruteo periódico con vehículos capacitados dependientes de la carga, para determinar el programa de ruteo de inventario semanal de menor riesgo para la recolección de desechos médicos y transporte a los sitios de tratamiento. Además, consideran el riesgo relacionado con el almacenamiento temporal de desechos peligrosos en los centros de salud. Proponen un enfoque heurístico basado en descomposición, resolviendo cada subproblema mediante la técnica de generación de columnas. Aplican la metodología propuesta para un caso de estudio en Dolj, Rumania.

Mohamed y colab. [11] abordan el problema de recolección de residuos biomédicos en un hospital de especialidades múltiples de gran tamaño en Coimbatore, India. La recolección y transporte la realizan 6 vehículos. Los autores proponen un modelo de ruteo con el objeto de minimizar el tiempo y los costos necesarios para la recolección. Para la resolución del problema aplican un algoritmo de enjambre de partículas. Con el plan de rutas obtenido, lograron una reducción del 42% del tiempo necesario para la recolección, eliminando totalmente el tiempo de espera.

Recientemente, a partir de la pandemia causada por la expansión del virus SARS-CoV-2, el problema de recolección de residuos médicos patológicos adquirió mayor importancia, teniendo en cuenta el considerable incremento en la generación de este tipo de residuos y los riesgos potenciales en un mal manejo de los mismos. Kargar y colab. [12] abordaron el problema de recolección de residuos patológicos en situación de pandemia. Desarrollaron un modelo de programación lineal con tres funciones ob-

jetivos de manera de minimizar los costos totales, el riesgo asociado al transporte y tratamiento de material infecto contagioso, y la cantidad de residuos no recolectados de los centros de generación. En su modelo consideran la posible instalación de centros temporales de tratamiento. Los autores desarrollan funciones que permiten estimar la cantidad de residuos generados según los parámetros del brote epidemiológico actual. Para la resolución del problema multiobjetivo, utilizan el método de programación por metas revisado. Se aplica la metodología propuesta para un caso real en Irán, y se realiza un análisis de sensibilidad sobre las soluciones obtenidas.

Eren y Tuzkaya [13] también abordaron el problema de la recolección de residuos médicos patológicos en la pandemia de Covid-19. En este trabajo, los autores aplican la escala de puntuación de seguridad para medir los riesgos relacionados con la salud humana y el medio ambiente en el manejo de desechos médicos desarrollada en un trabajo previo [9]. Derivaron dos funciones objetivo, basadas en las puntuaciones de seguridad y la distancia total de transporte. Implementaron el enfoque de función de pertenencia para construir un modelo de compromiso. Aplicaron el modelo propuesto considerando un único vehículo para realizar la recolección en 15 hospitales de la ciudad de Estambul, Turquía de manera de determinar las rutas de transporte más cortas y más seguras.

Respecto a trabajos aplicados a ciudades y regiones argentinas, sólo se pudo encontrar el trabajo de [14]. En este trabajo, los autores abordan el problema de la determinación de las rutas óptimas de recolección de residuos infecciosos en la ciudad Río Cuarto, Córdoba, considerando las restricciones de capacidad de los vehículos usados. Los autores formulan un problema mixto entero lineal para el problema y proponen un método heurístico aproximado para su resolución.

Finalmente, se puede mencionar el trabajo de [15] como uno de los que revisa el estado del arte de los aportes hechos a través de implementaciones de programación matemática multicriterio aplicadas al problema de recolección de residuos.

En este contexto, resulta clara la relevancia del problema que se propone abordar. En efecto, un análisis sistemático para la determinación de la programación óptima de la logística para la recolección y transporte de residuos patológicos, asegurará un plan de manejo eficiente de estos desechos, impactando directamente en la economía, el medio ambiente y la salud de la población. Por lo tanto, en este trabajo se propone un modelo matemático de tipo mixto entero lineal (MILP) basado en el concepto de robustez ligera [16] para un problema de recolección y transporte regular de residuos patológicos. Además de la formulación, en el trabajo se presenta un algoritmo de Ramificación y Acotamiento (Branch-and-Bound) para resolver en forma más eficiente la instancia de problema abordada. Su desempeño es evaluado y comparado con un enfoque anterior de la literatura.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. La descripción del problema de recolección de residuos se proporciona en la sección 2. La sección 3 presenta la formulación matemática propuesta para resolver el problema. En la sección 4 se presenta la estrategia de resolución desarrollada. El caso de estudio abordado y los resultados obtenidos se muestran en la sección 5. Finalmente, las observaciones finales se dan en la sección 6.

2 Descripción del problema

En esta sección, se describe el problema de la gestión de residuos patológicos generados en establecimientos de salud que será modelado matemáticamente en la siguiente sección. El problema a resolver consiste en determinar la programación semanal de recorridos de los vehículos disponibles para visitar un número dado de establecimientos y recolectar los desechos generados para llevarlos al sitio donde serán incinerados.

El objetivo es determinar la programación de recorridos que minimice los costos totales de transporte mientras se cumplen restricciones de capacidad, tiempo y seguridad provenientes del correcto manejo de dichos residuos peligrosos.

Dado un conjunto K de vehículos disponibles para la recolección de desechos patológicos y un número N de establecimientos de salud a ser visitados, el problema debe tener en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- (i) se dispone de un único centro de incineración;
- (ii) cada recorrido comienza y termina en el centro de incineración,
- (iii) la cantidad diaria de desperdicios generada en cada hospital es desconocida;
- (iv) dos visitas consecutivas a un mismo hospital deben realizarse antes de una cierta cantidad de días;
- (v) los camiones pueden hacer varios viajes diarios, mientras los tiempos de los recorridos realizados no superen el tiempo de trabajo diario.
- (vi) la suma de la cantidad de desechos recolectados por cada camión en cada recorrido no puede superar la capacidad del camión,
- (vii) se considera que existe un tiempo fijo y conocido entre que un camión llega a un centro hospitalario y lo deja (existe un tiempo de servicio).

3 Modelo matemático

Se plantea un modelo matemático mixto entero lineal (MILP) para abordar el problema descrito en la sección anterior, llamado problema P. El modelo considera todas las características especificadas teniendo en cuenta que la cantidad de residuos generados diariamente varía en forma aleatoria. El modelo trata la incertidumbre mediante el concepto de robustez ligera donde se relajan las restricciones con el objeto de obtener soluciones de mejor calidad. Este concepto considera como hipótesis fundamental que la solución del problema de optimización, teniendo en cuenta el caso promedio, es relativamente buena mientras se cumplen de la mejor manera posible las restricciones del problema considerando la variabilidad de los parámetros desconocidos. De esta forma, el concepto de robustez ligera establece una relación de compromiso entre robustez y calidad de la solución.

A continuación, se detallan los conjuntos, parámetros y variables empleados en el modelo:

Conjuntos

I	Conjunto de hospitales
D	Conjunto de Días
C	Conjunto de Camiones
RC_c	Recorridos por camión

Parámetros

d_{ij}	Distancia entre los nodos i y j
vel	Velocidad promedio de los camiones
ts	Tiempo de servicio
hl	Cantidad máxima de horas de viaje diarias de cada camión
NC	Número total de camiones disponibles
Q	Capacidad de cada camión
NH	Cantidad de nodos (Incinerador y hospitales)
q_i	Cantidad promedio de desperdicios generados por el hospital i en el periodo total considerado
tp	Cantidad de días del periodo de tiempo total considerado
tmv	Tiempo máximo entre visitas de recolección consecutivas
ρ_i	Incremento en la cantidad de desperdicio generado por el hospital i

Variables

x_{ijrd}	Variable binaria que vale 1 si el día d el recorrido r del camión c va del hospital i al j
qv_{ird}	Variable continua que especifica la cantidad de desperdicios que carga en el recorrido r el camión c en el hospital i el día d .
qd_{id}	Variable continua que especifica la cantidad de desperdicios generados en el hospital i el día d .
u_{ird}	Variable continua auxiliar para evitar los sub-ciclos en los recorridos de los camiones. La variable se establece para todos los hospitales i , todos los camiones c , todos los recorrido r de los camiones y todos los días d .

La formulación matemática se desarrolla a continuación. La ecuación (1) minimiza la distancia total recorrida por los camiones. La restricción (2) establece que a cada hospital se llega y se parte igual cantidad de veces. La ecuación (3) indica que cada hospital se visita como máximo una vez por día. La restricción (4) asegura que el camión debe salir como máximo una vez por cada recorrido. La ecuación (5) impone el máximo tiempo ocupado por cada camión para completar todos los recorridos realizados en un día. La ecuación (6) establece que los camiones deben transportar la cantidad promedio de desechos generados en cada centro durante el periodo de tiempo considerado. La ecuación (7) indica que la cantidad total de residuos transportados desde un dado centro durante el periodo de tiempo considerado debe ser mayor o igual que la suma de las cantidades diarias de desperdicio generadas por el centro durante el mismo periodo. La restricción (8) indica que la cantidad diaria de residuos generados por los centros en un día debe ser mayor o igual que la suma de las cantidades medias de residuos generadas por día por los hospitales. La restricción (9) impone la condición de que la cantidad de residuos cargada en un camión en un determinado recorrido debe ser

menor o igual a la capacidad del camión. Es importante destacar que la cantidad total de residuos considerados como carga efectiva del camión debido a un dado hospital, se determina como la suma de la cantidad de residuos cargados más una cantidad extra que depende de las características estadísticas de la generación de residuos de ese hospital. Las restricciones (6) a (9) corresponden a la implementación en el modelo del concepto de robustez ligera que permite obtener soluciones de buena calidad basada en valores promedios y al mismo tiempo incrementa la factibilidad de la solución considerando posibles incrementos en las cantidades de desperdicios generados exclusivamente por los centros visitados. En particular, las restricciones (6) y (8) representan la parte ligera del concepto de robustez debido a que establecen que las cantidades de desperdicios considerados deben cumplir con los valores promedios semanales y diarios de residuos generados. Por otra parte, la restricción (9) impone la condición rigurosa, la cual viene del concepto de robustez estricta, de que las cantidades de residuos cargados en un mismo camión (que se establecen en función de los valores promedios diarios y semanales), más una cierta cantidad de residuos que considera la condición más desfavorable de generación diaria de cada hospital visitado, debe ser menor o igual que la capacidad máxima de carga del camión. La restricción (10) impone la condición de que un centro de salud debe ser visitado como máximo cada una cierta cantidad de días. Finalmente, la ecuación (11) se emplea para para eliminar sub-rutas de los camiones, dado que la misma elimina los recorridos que no comienzan, ni terminan, en el centro de incineración.

$$\text{Min} \sum_{i,j \in I, r \in RC_c, c \in C, d \in D} x_{ijrcd} * d_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in I} x_{jircd} = \sum_{j \in I} x_{ijrcd} \quad \forall i \in I, r \in RC_c, c \in C, d \in D \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I, r \in RC_c} x_{jircd} \leq 1 \quad \forall i \in I \setminus \{1\}, r \in RC_c, c \in C, d \in D \quad (3)$$

$$\sum_{j \in I} x_{1jrcd} \leq 1 \quad \forall r \in RC_c, c \in C, d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{i,j \in I, r \in RC_c} [(x_{ijrcd} * (d_{ij}/vel + ts))] \leq hl \quad \forall i \in I, c \in C, d \in D \quad (5)$$

$$\sum_{r \in RC_c, c \in C, d \in D} qv_{ircd} = q_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{r \in RC_c, c \in C, d \in D} qv_{ircd} \geq \sum_{d \in D} qd_{id} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} qd_{id} \geq \sum_{i \in I} q_i/tp \quad \forall d \in D \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} (qv_{ircd} + \rho_i) \leq Q \quad \forall r \in RC_c, c \in C, d \in D \quad (9)$$

$$\sum_{j \in I, r \in RC_c, c \in C,} x_{jircd} + x_{jircd+1} + x_{jircd+2} \geq 1 \quad \forall i \in I, d \in D, \quad (10)$$

$$d \leq (dlast - tmv)$$

$$u_{ircd} - u_{jr cd} + NH * x_{ijr cd} \leq NH - 1 \quad \forall i, j \in I, i \neq j, i \neq 1, \quad (11)$$

$$j \neq 1, r \in RC_c, c \in C, d \in D$$

4 Metodología

En esta sección se presenta la metodología propuesta para resolver el problema de programación matemática formulado en la Sección 2. Dada la complejidad conocida de los problemas de ruteo de vehículos, generada principalmente por la característica combinatoria del conjunto de soluciones, se diseñó un algoritmo del tipo de Ramificación y Acotamiento (Branch-and-Bound) específico para el problema a resolver.

El esquema general del algoritmo diseñado es presentado en la Figura 1.

En cada iteración se resuelve el problema P presentado en la Sección 2 en un nodo específico, bajo ciertos criterios de parada, ya que el problema a resolver es del tipo mixto entero lineal. La ramificación se realiza considerando la decisión de visitar o no un hospital a elegir en un día a elegir.

A continuación, se detallan los criterios utilizados en el algoritmo de la Figura 1.

- Se genera un árbol (lista de nodos). Para cada nodo se guarda la cota inferior del valor objetivo del problema en el nodo.
- En cada iteración se resuelve el problema P en un nodo. Se fija un gap de optimalidad a alcanzar, de acuerdo a la profundidad del nodo en el árbol generado. Se establece un tiempo límite de resolución.
- En cada iteración se elige el nodo que tenga menor cota inferior.
- La Ramificación se realiza eligiendo un par hospital-día: $i-d$. En primer lugar se elige un hospital, de acuerdo a la cantidad de desperdicios generados semanalmente, de mayor a menor: se busca el primer hospital que tenga algún día sobre el que no se haya tomado decisión en el nodo. Luego se elige el día sobre el que se ramificará.
- Se ramifica generando dos nuevos nodos:
 - En uno de los nodos se considera que el hospital i no será visitado el día d . Es decir, en este nodo se fijará: $x_{i,j,r,c,d}=0 \quad \forall i,j \in I, r \in RC_c, d \in D$.
 - En el otro nodo se considera que el hospital i será visitado el día d . Para imponer esta decisión se incorporarán dos restricciones a la resolución del nodo:

$$\sum_{j \in I, r \in RC_c} x_{ijrca} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{j \in I, r \in RC_c} x_{jirca} = 1 \quad (13)$$

Además, se agregaron al modelo restricciones de ajuste, que son redundantes, pero ajustan la región factible, mejorando la eficiencia de resolución.

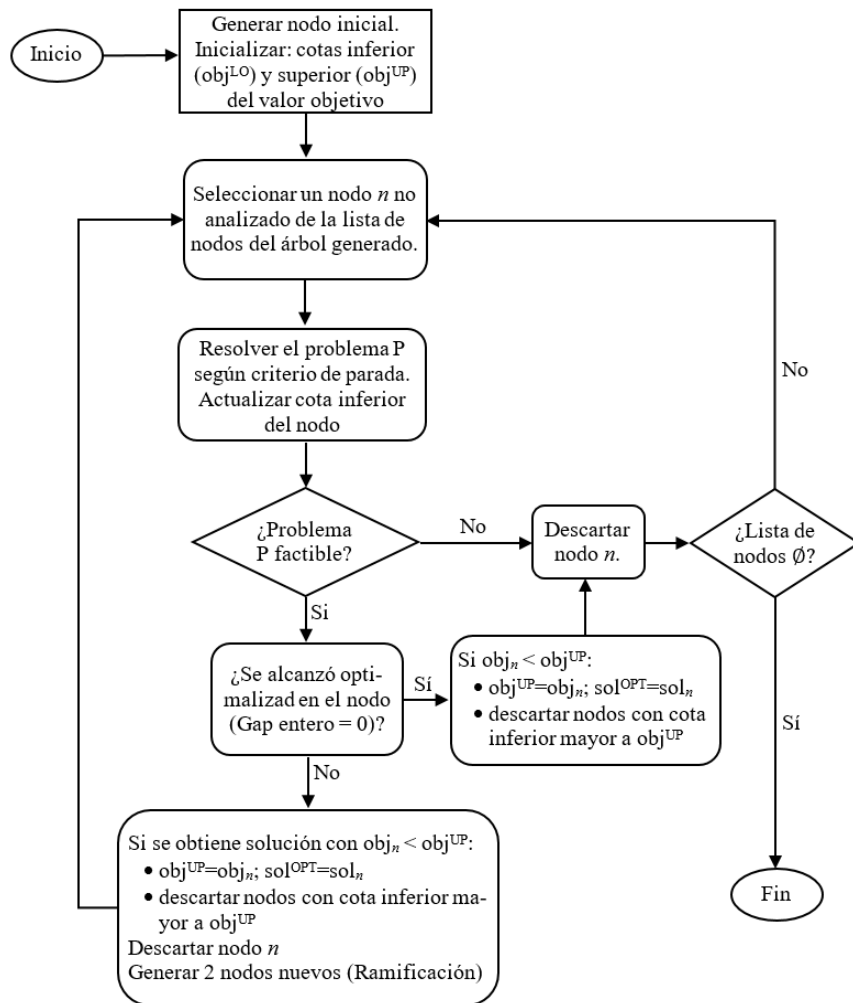


Fig. 1. Esquema del algoritmo de Ramificación y Acotamiento (Branch-and-Bound) propuesto para resolver el problema de la Sección 2.

5 Caso de estudio y resultados

Como caso de estudio se considera la región del norte de Jordania. Este caso real es presentado en [5]. Se considera la necesidad de recolectar los desechos patológicos generados en diecinueve hospitales. Para ello se dispone de 2 camiones y un único lugar de tratamiento equipado con un incinerador. Se busca mejorar el sistema, determinando el recorrido de los camiones que minimice los costos operativos de la empresa que realiza el trabajo y recoja todos los desperdicios generados por los diecinueve hospitales. La planificación de los recorridos se debe hacer por semana y la misma debe mantenerse en el tiempo.

Las distancias en km entre los hospitales y de cada hospital al incinerador se puede encontrar en [5]. En este problema, cada hospital debe ser visitado al menos una vez cada 3 días, y los días domingo son no laborables.

La Tabla 1 muestra una lista de estos hospitales y la cantidad de desechos promedios generados por semana, según datos reportados en [5], que corresponden a datos históricos para estos hospitales.

Tabla 1. Desechos promedios semanales de los hospitales del Norte de Jordania [5].

Hospital	Desechos promedios semanales (kg)
H1	2195,2
H2	94,08
H3	180,32
H4	23,52
H5	47,04
H6	31,36
H7	39,2
H8	360,64
H9	282,24
H10	556,64
H11	1254,4
H12	1411,2
H13	297,92
H14	352,8
H15	133,28
H16	196
H17	784
H18	297,92
H19	274,4

Diariamente, cada camión recolector inicia su viaje desde el incinerador, recolecta desechos médicos de los hospitales enumerados en su ruta programada y luego conduce de vuelta al incinerador. Cada uno de estos dos camiones tiene capacidad para recoger hasta 1500kg de residuos médicos por viaje.

Si bien en el caso reportado no se considera tiempo de servicio en cada hospital ni horas de trabajo diaria máxima por vehículo, aquí se resolverá asumiendo un tiempo de servicio fijo de 20 minutos en cada hospital y un tiempo límite de trabajo diario de 8 horas por vehículo. En dicho trabajo tampoco se considera que los camiones recolectores puedan hacer múltiples viajes por día. En la resolución considerada aquí se permite que los camiones realicen más de un recorrido por día, sin exceder el tiempo límite de trabajo diario por camión.

La metodología de resolución propuesta fue implementada en Pyomo [17] y cada problema MIP fue resuelto con el solver Gurobi 10.0.1, en una computadora Intel Core i7-7700K 3.8GHz y 32 GB de memoria RAM.

Para poder evaluar la eficacia del método propuesto, también se resolvió el modelo presentado en la sección 3 usando el solver Gurobi con un tiempo límite de 3600s para ambas resoluciones.

La Tabla 2 reporta las características de las soluciones obtenidas para el problema, así como la solución presentada en [5], en donde los autores encuentran una solución que ahorra 102 km respecto a los recorridos que realizaban los camiones habitualmente, aplicando una rutina de algoritmo genético.

Tabla 2. Resultados obtenidos para los hospitales del Norte de Jordania. Comparación con la resolución del solver Gurobi y la solución reportada en [5].

	Solución reportada en [5]	Solver Gurobi	Metodología pro- puesta
Recorrido total (función objetivo)	1185 km	1014 km	988 km
Recolección total	8647 kg	8812 kg	8812 kg
Gap de optimalidad	-	18,15%	14,47%
Tiempo de cómputo	no reportado	3600 CPUs	3600 CPUs

Según puede verse en la Tabla 2, la metodología propuesta consigue la mejor solución y el mejor gap de optimalidad para un tiempo de cómputo límite de 3600 CPUs.

La Tabla 3 muestra la solución obtenida, comparada con la mejor solución hallada por Gurobi y la solución reportada en [5].

Tabla 3. Comparación de soluciones para el problema de los 19 hospitales del Norte de Jordania.

Día	Camión	Kilogramos recogidos		
		Solución reportada en [5]	Solver Gurobi	Metodología propuesta
1	1	1402,76	1500	1500
	2	950,07	439,84	679,84
2	1	1095,45	1500	79,52
	2	-	-	-
3	1	1011,27	1500	1116,64
	2	597,36	-	191,52
4	1	501,09	450,24	1500
	2	439,82	-	-
5	1	889,35	1335,20	1057,44
	2	576,55	-	-
6	1	712,23	1500	1500
	2	471,28	586,88	1187,20

6 Conclusiones

El trabajo presenta un modelo matemático para el problema de operación regular de la recolección y transporte hasta el lugar de tratamiento de residuos patológicos generados en establecimientos de salud, como hospitales y sanatorios. La formulación desarrollada representa el problema real incorporando las principales restricciones que lo condicionan, optimizando las distancias recorridas por los medios de transporte disponibles. Además, el trabajo presenta una estrategia de resolución de tipo Ramificación y Acotamiento (Branch-and-Bound) que permite mejorar los tiempos de resolución de las instancias de problemas abordados. La técnica surge del estudio del problema abordado. Finalmente, el modelo matemático y la técnica de resolución desarrollados se aplicaron a un caso de estudio real tomado de la literatura, verificando de esta forma su validez y aplicabilidad.

Referencias

1. Lahyani, R., Khemakhem, M., Semet, F., "Rich Vehicle Routing Problems: From a taxonomy to a definition", *European Journal of Operational Research* 241(1): 1-14, 2015.
2. Koc C., Bektas T., Jabali O., Laporte G., "Thirty years of heterogeneous vehicle routing", *European Journal of Operational Research* 249(1): 1-21, 2016.
3. Vidal T., Laporte G., Matl P., "A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants", *European Journal of Operational Research* 286(2): 401-416, 2020.
4. Zajac S., Huber S., "Objectives and methods in multi-objective routing problems: a survey and classification scheme", *European Journal of Operational Research* 290(1):1-25, 2021.
5. Alshraideh H., Abu Qdais H., Stochastic modeling and optimization of medical waste collection in Northern Jordan. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19(2) (2017): 743-753.

6. He Z., Li Q., Fang J., "The Solutions and Recommendations for Logistics Problems in the Collection of Medical Waste in China", *Procedia Environmental Sciences* 31: 447-456, 2016.
7. Baran E. "Optimizing Medical Waste Collection in Eskişehir by Using Multi-Objective Mathematical Model", *Journal of Science, Part A*, 4(4): 93-100, 2017.
8. Mantzaras G., Voudrias E.A., "An optimization model for collection, haul, transfer, treatment and disposal of infectious medical waste: Application to a Greek region", *Waste Management* 69: 518-534, 2017.
9. Eren E., Tuzkaya U.R., "Occupational health and safety-oriented medical waste management: A case study of Istanbul", *Waste Management & Research* 37(9): 876-884, 2019.
10. Taslimi M., Batta R., Kwon C., "Medical waste collection considering transportation and storage risk", *Computers & Operations Research* 120: 104966, 2020.
11. Mohamed Faizal U., Jayachitra R., Vijayakumar P., Rajasekar M., "Optimization of inbound vehicle routes in the collection of bio-medical wastes", *Materials Today: Proceedings*, 2020.
12. Kargar S., Pourmehdi M., Paydar M.M., "Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19)", *Science of the Total Environment* 746: 141183, 2020.
13. Eren E., Tuzkaya U.R., "Safe distance-based vehicle routing problem: Medical waste collection case study in COVID-19 pandemic", *Computers & Industrial Engineering* 157: 107328, 2021.
14. Simón S., Demadé J., Hernández J., Carnero M., "Optimización de Recorridos para la Recolección de Residuos Infecciosos", *Información Tecnológica* 23(4): 125-132, 2012.
15. Goulart Coelho L.M., Lange L.C., Coelho H.M.G., "Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods", *Waste Management & Research* 35(1): 3-28, 2017.
16. Fischetti M, Monaci M. Light robustness. In: *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Springer; 2009. pp. 61-84
17. Bynum, Michael L., Gabriel A. Hackebeil, William E. Hart, Carl D. Laird, Bethany L. Nicholson, John D. Sirola, Jean-Paul Watson, and David L. Woodruff. *Pyomo - Optimization Modeling in Python*. Third Edition Vol. 67. Springer, 2021.