

ASIGNACIÓN EFICIENTE DE RUTAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LECHE

EFFICIENT ASSIGNMENT OF ROUTES FOR MILK COLLECTION

Carlos A. Bonetti, Gabriel D. Puccini, Melina Denardi, Jezabel D. Bianchotti y Sergio E. Bertone

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina, gabriel.puccini@frfa.utn.edu.ar

Palabras clave: Enrutamiento de vehículos, Recocido Simulado, Industria Láctea, Optimización.

Resumen. En los últimos años, el uso de herramientas computacionales y la disponibilidad de información en tiempo real han mejorado la eficiencia de diversos procesos productivos. Sin embargo, la logística en la recolección de leche en el sector lácteo sigue siendo planificada manualmente. Optimizar la asignación de tambos a los camiones que recolectan la leche es una gran oportunidad para mejorar los costos y los tiempos involucrados. En el presente trabajo se propone una metodología que permite tomar datos reales de una zona específica y determinar un recorrido eficiente para cada camión, con el objetivo de reducir la distancia total recorrida. El caso de aplicación empleado se basa en datos relevados en industrias de la región pampeana, y la herramienta desarrollada emplea Recocido Simulado como técnica de optimización. Como resultado de la implementación de esta herramienta, se logra una reducción significativa en la distancia total recorrida.

Keywords: Vehicle Routing, Simulated Annealing, Dairy Industry, Optimization.

Abstract. In recent years, the use of computational tools and the availability of real-time information have improved the efficiency of various production processes. However, logistics in milk collection in the dairy sector is still manually planned. Optimizing the allocation of dairy farms to the trucks that collect the milk is a great opportunity to improve costs and the times involved. This paper proposes a methodology that allows taking real data from a specific area and determining an efficient route for each truck, with the aim of reducing the total distance traveled. The case study used is based on data collected from industries in the Pampas region, and the developed tool employs Simulated Annealing as an optimization technique. As a result of the implementation of this tool, a significant reduction in the total distance traveled is achieved.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la logística se ha convertido en un componente crucial para el éxito de las organizaciones. Aunque no añade valor directo a los productos, su papel en la cadena de valor es fundamental. La optimización de la logística mediante herramientas tecnológicas no solo mejora los procesos, sino que también reduce costos y disminuye la huella de carbono, un factor cada vez más relevante en un contexto de creciente concientización ambiental ([López-Castro et al., 2023](#)).

El campo de la logística ha cambiado significativamente en los últimos años, impulsado por nuevas formas de transporte, avances tecnológicos y la disponibilidad de información en tiempo real. Estos cambios impactan en todas las industrias, especialmente aquellas donde el transporte juega un papel fundamental en su actividad y estructura de costos. La industria láctea es un claro ejemplo, ya que debe recolectar su materia prima principal, la leche, de los centros productores (tambos) diariamente, asegurando que no se deteriore su calidad y que se aprovisione a las plantas manufactureras a tiempo para cumplir con la planificación de la producción.

Históricamente, la logística en la industria láctea ha sido gestionada de manera intuitiva y manual, y en muchas empresas esta sigue siendo la práctica común en Argentina. Sin embargo, la eficiencia logística en la recolección y transporte de la leche cruda presenta desafíos considerables. La extensión de los recorridos resulta en un uso ineficiente de los camiones, que operan con una capacidad ociosa promedio del 30 %. Esta ineficiencia no solo incrementa los costos operativos, sino que también contribuye al aumento de la huella de carbono.

Además, la gestión independiente de los recorridos por transportistas tercerizados, basada en tambos preestablecidos, limita la flexibilidad de los recorridos. Para abordar esta problemática, es necesario un cambio de paradigma hacia una gestión coordinada y colaborativa de los camiones, una estrategia que ya se está adoptando en otros países ([Paredes-Belmar et al., 2016](#)). La incertidumbre en la planificación de rutas y la gestión de flotas afecta directamente la eficiencia de los recorridos, la calidad de la leche y los costos operativos, repercutiendo en el producto final.

La identificación del recorrido más eficiente para el transporte de leche es un tipo de problema que surge en numerosos sistemas de distribución, conocido en la literatura científica como el Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP) ([Yeun et al., 2008](#); [Marinakis y Migdalas, 2007](#)). Algunos autores han abordado el VRP para la recolección de leche utilizando Programación Lineal de Enteros Mixtos y técnicas de iteración local debido a la complejidad del problema ([Paredes-Belmar et al., 2022](#)).

En este trabajo se aborda un problema de optimización de recorridos para el transporte de leche basado en el modelo presentado en un estudio anterior ([Bonetti et al., 2023](#)). En esta nueva investigación, se propone una metodología para optimizar la recolección de leche en un área de 10.350 kilómetros cuadrados y su posterior transporte hacia las plantas de procesamiento. La implementación de esta herramienta se llevó a cabo en una zona de gran actividad lechera de la provincia de Santa Fe, basada en datos relevados de industrias lácteas de la región. En esta implementación se modelaron 400 establecimientos productores, que son visitados diariamente por 55 camiones y abastecen a tres plantas manufactureras. Dada la complejidad del problema debido a su naturaleza combinatoria, se empleó un algoritmo metaheurístico que permite obtener una solución de alta calidad en un tiempo de cómputo razonable, de modo que la asignación de rutas se pueda realizar diariamente al iniciar la jornada laboral de los conductores de los camiones. Los métodos de optimización tradicionales pueden hacer que la búsqueda de una solución exacta a este problema sea computacionalmente muy costosa o incluso impracti-

cable. Por ello, en este trabajo se ha optado por utilizar el algoritmo metaheurístico de recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983).

2. METODOLOGÍA

2.1. Caso de estudio

El caso de estudio consta de cuatrocientos tambos (indicados en color anaranjado), tres plantas industriales (indicadas en color azul), y un estacionamiento (indicado en color rojo) como se muestra en la Fig. 1. Se modelan 55 camiones, cada uno de los cuales comenzará y finalizará su recorrido en el estacionamiento. En el trayecto deben recolectar la leche de todos los tambos asignados en cada solución y, finalmente, trasladarla a las plantas para su procesamiento.

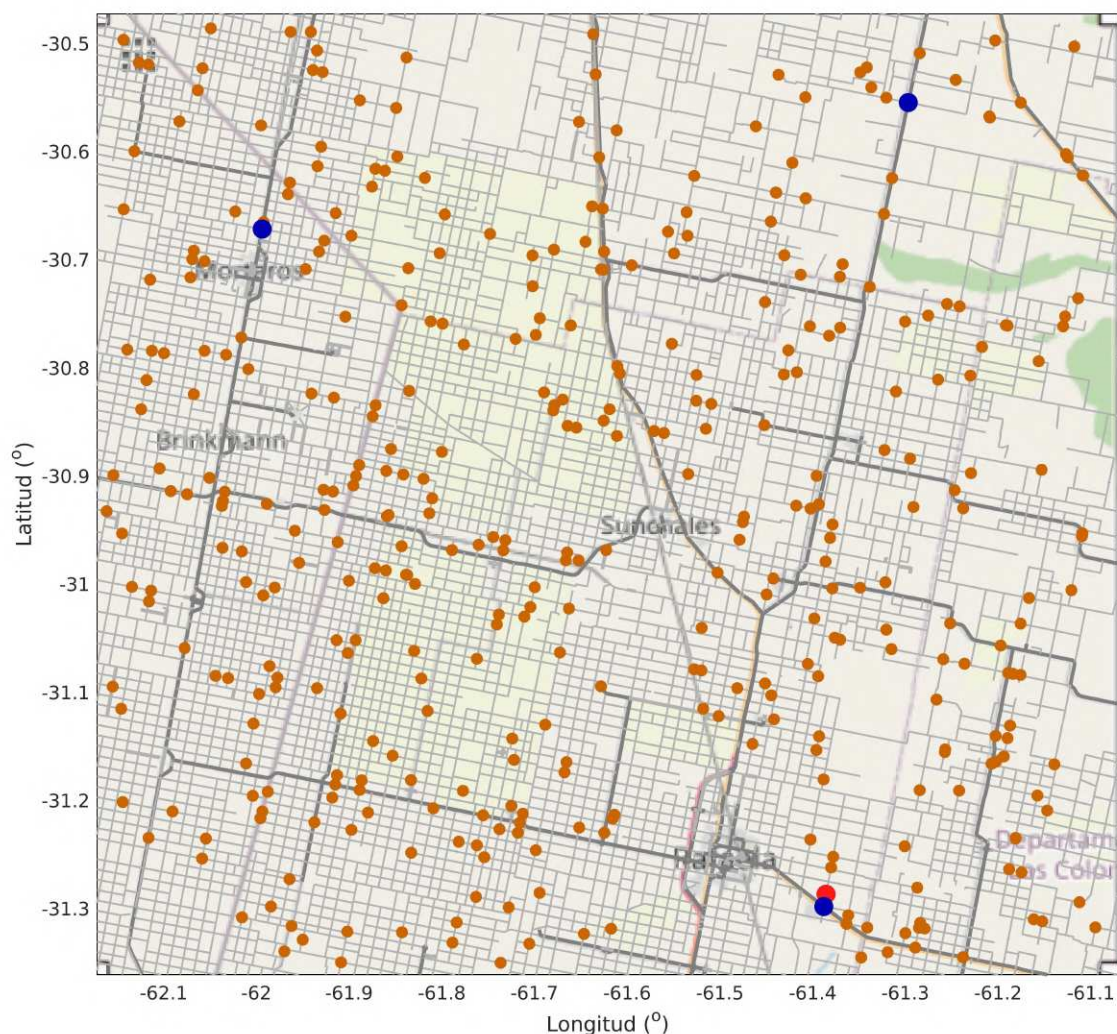


Figura 1: Caso de Estudio.

La cantidad de tambos que visita cada camión dependerá de los litros que producen diariamente, con una media de 2600 litros comprendida entre valores mínimos y máximos de 595 litros y 11.916 litros, respectivamente. Se cuenta con una flota heterogénea de camiones, 27 camiones con una capacidad de 30.000 litros, 19 camiones con una capacidad de 28.000 litros y 9 camiones con una capacidad de 18.000 litros. Para contemplar las posibles desviaciones diarias

en la producción de los tambos se consideró una capacidad efectiva del 97,3 %, permitiendo recolectar como máximo de 29.190, 27.244 y 17.514 litros respectivamente para los tres tamaños de camiones considerados.

Las tres plantas modeladas cuentan con distintos requerimientos productivos detallados en la Tabla 1. Se puede observar que la planta 2 tiene las propiedades de una planta central, siendo la que más litros puede procesar, y la que más flexibilidad tiene en cuanto a los litros de leche que puede recibir, permitiendo absorber las variaciones en la producción primaria. En contraste, las otras dos plantas tienen un rango característico de las plantas monoproducción, con una tolerancia a las variaciones en los litros que pueden recibir más acotadas. Es importante señalar que el diseño del caso de estudio se basa en una simplificación que toma como referencia un relevamiento de la situación actual de las empresas de la región centro de Santa Fe. El modelo propuesto, por lo tanto, integra los aspectos principales identificados en este contexto.

	Mínimo (Lt)	Máximo (Lt)
Planta 1	70.000	85.000
Planta 2	10	1.000.000
Planta 3	100.000	140.000

Tabla 1: Cantidad de litros de leche mínimos y máximos requeridos por cada planta industrial.

2.2. Formulación del problema

El problema de optimización consiste en minimizar la función objetivo FO que se define en la Ec. 1 como la suma total de la distancia medida en kilómetros D_{km} que recorren los N_T camiones en sus respectivos trayectos para visitar a los tambos que le han sido asignados, esta asignación se detalla en el vector r_i correspondiente a cada camión.

$$FO = \sum_{i=1}^{N_T} D_{km}(r_i) \quad (1)$$

sujeto a las siguientes restricciones:

1. Restricciones de capacidad de los tanques de los camiones:

$$\sum_{t \in r_i} L(t) \leq \text{Cap}(c_i) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_C$$

2. Restricciones de cantidad de leche a entregar en cada planta manufacturera:

$$L_{\max}(p_i) \geq \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{t \in r_i} L(t) \cdot X(c_i, p_i) \geq L_{\min}(p_i) \quad \forall p_i \in P$$

donde $L(t)$ denota la cantidad de litros de leche producida por el tambo t , r_i es el recorrido que contiene los índices de los tambos en el orden de recolección y de la planta p_i para el camión c_i , $\text{Cap}(c_i)$ es la capacidad máxima de los tanques del camión c_i , $L_{\max}(p)$ ($L_{\min}(p_i)$) es la capacidad máxima (mínima) de litros que puede recibir la planta p_i , $X(c_i, p_i)$ es una variable binaria que indica si el camión c_i entrega leche en la planta p_i .

Para modelar el problema, se establecen cincuenta y cinco vectores que son las variables de decisión, cada uno de los vectores representa un recorrido que determina el orden en que deben ser visitados los tambos para cada camión y su correspondiente planta de descarga. En cada iteración este orden será modificado aleatoriamente para obtener una nueva solución, que será evaluada de acuerdo a la Ec. 1, siempre que dicha solución no exceda la capacidad de los tanques de los camiones (primera restricción). Asimismo, la cantidad de leche entregada en cada planta manufacturera debe estar dentro de los límites establecidos en la Tabla 1, asegurando que no se supere la capacidad máxima permitida y que se cumpla con la cantidad mínima requerida para cada planta, recolectando la totalidad de litros disponibles (segunda restricción).

El problema VRP con los condicionantes de capacidad que presenta la recolección de leche cruda es un desafío complejo que requiere un algoritmo metaheurístico para encontrar soluciones cercanas al óptimo global. En el presente trabajo se implementa el algoritmo estocástico conocido como recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983). Este método comienza con una solución inicial y busca mejorarla explorando soluciones cercanas con menor valor de FO. El recocido simulado permite, bajo ciertas condiciones, aceptar soluciones con un valor mayor de FO que podrían no ser beneficiosas inicialmente. Esta estrategia permite evitar quedar atrapado en soluciones óptimas locales. Este proceso se rige por un parámetro llamado temperatura, que disminuye gradualmente a lo largo de las iteraciones. Al principio, la temperatura es alta, lo que facilita la aceptación de soluciones con un valor de FO mayor, pero a medida que avanza el proceso y la temperatura baja, el criterio se vuelve más estricto. Este enfoque emplea la probabilidad de Boltzmann, que se utiliza para determinar cuándo aceptar una solución menos favorable, ayudando al algoritmo a explorar diferentes configuraciones en busca de las rutas más eficientes. Para la exploración del espacio solución, los métodos de perturbación modifican aleatoriamente el orden y cantidad de tambos que se asignan a cada camión y la planta de descarga del mismo.

Para abordar el problema expuesto y obtener la solución que se detallará en la siguiente sección, fueron necesarias 5 horas de búsqueda, soluciones similares se encontraron con un tiempo de cómputo de media hora en una PC de escritorio con un procesador i7.

3. RESULTADOS

Para comparar el método propuesto frente a la metodología actual de asignación de recorridos, en primera instancia se generó una planificación logística de recolección de leche cruda que refleje lo más fielmente posible el funcionamiento actual de las empresas lácteas relevadas en la región, es decir, de modo manual basándose en la experiencia previa o en la intuición con una utilización de los camiones en promedio del 70 % de su capacidad. Así se generaron 55 clusters. En la Figura 2 se exponen los recorridos de 9 de los 55 camiones para recolectar la leche de los tambos y la planta de descarga correspondientes al cluster que le fue asignado. En todos los casos se observa que los camiones viajan hasta un agrupamiento de tambos a recolectar leche, luego van a descargar a la planta y finalmente regresan al estacionamiento. La solución manual determina un valor de $FO = 10880$ según la Ec. 1, es decir, que se recorren 10880 km. Esta propuesta de recolección tiene una eficiencia de 95,5 litros recolectado por kilómetro recorrido. En promedio cada camión recorre 198 km.

Por otro lado, con la aplicación del método de optimización propuesto se obtuvo una solución del VRP con un valor de $FO = 7157$ según la Ec. 1, es decir, una distancia mínima total de 7157 km. En la Figura 3 se exponen los recorridos de 9 de los camiones de esta solución. Puede notarse como recocido simulado propone soluciones poco intuitivas, deteniéndose a recolectar leche cruda en tambos no necesariamente próximos durante todo su recorrido. Esta estrategia

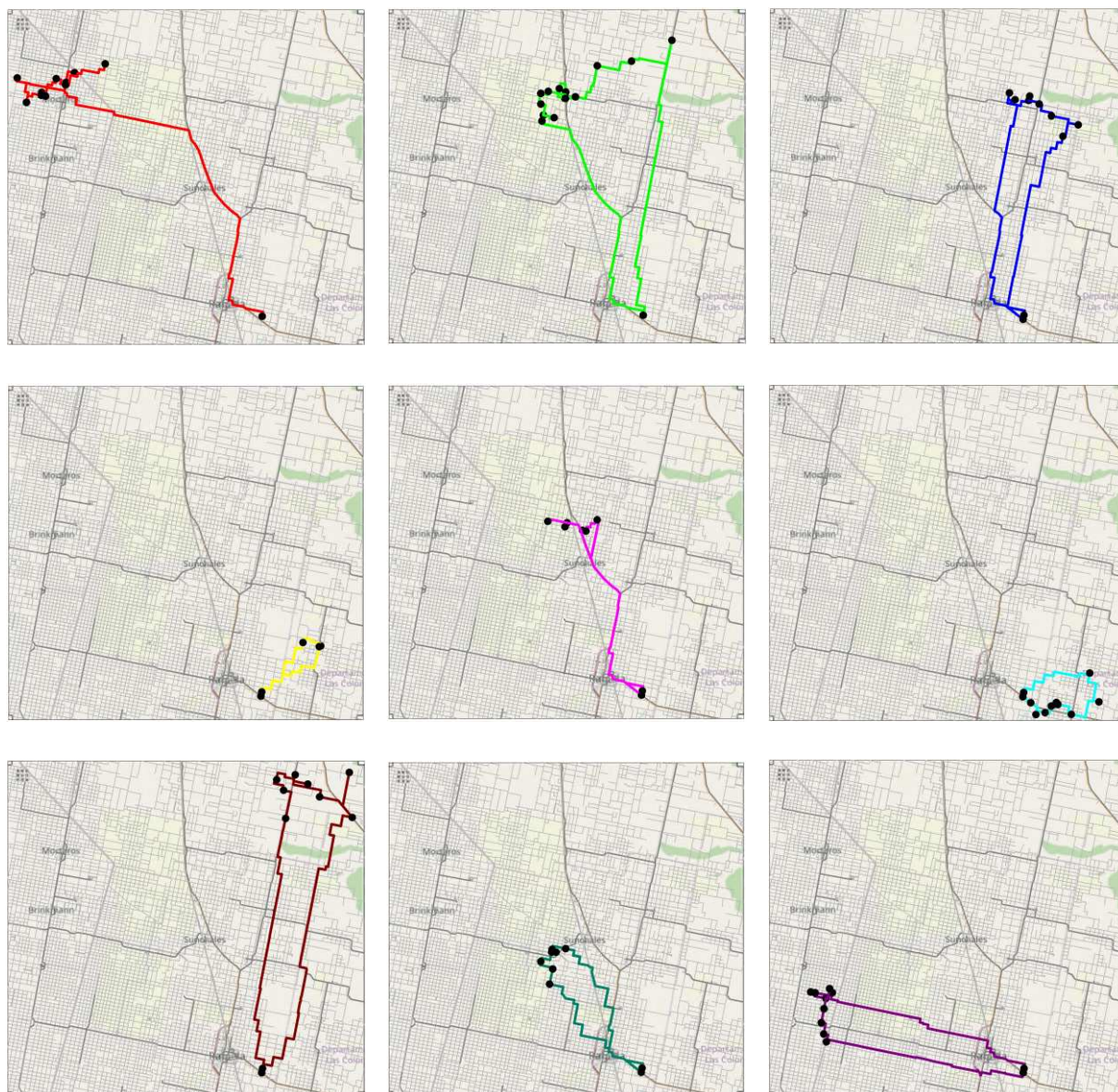


Figura 2: Recorridos de nueve camiones de la solución manual. En distintos colores se indican los caminos que recorre cada camión, y con puntos negros se indica la localización de los tambos donde ese camión recolecta leche.

no representan una adición de kilómetros al valor total de FO , por el contrario, se reduce significativamente. Esto se traduce en un aumento en la eficiencia de los recorridos, obteniéndose en este caso 145,3 litros recolectado por kilómetro.

En esta solución la menor distancia total recorrida se encuentra adoptando la estrategia de emplear solo 38 camiones de los 55 disponibles, esto significa una reducción de 17 camiones para recolectar la misma cantidad de leche. Debido a esto, la utilización de la capacidad de los camiones que son empleados asciende a 96 %. Incluso con esta reducción de la flota de camiones utilizada, se logra reducir los recorridos de cada camión, obteniendo una distancia promedio de 188 km empleados por camión. En la Tabla 2 se detallan todos los resultados expuestos para comparar las dos soluciones analizadas.

	Manual	Óptima
Distancia total en kilómetros	10.880	7.157
Litros/kilómetros recorrido	95,5	145,3
Utilización promedio	70 %	96 %
Camiones empleados/camiones disponibles	55/55	38/55
Kilómetros/camión	198	188

Tabla 2: Comparación de la asignación manual y la solución optimizada con recocido simulado.

Se puede observar comparando los recorridos expuestos por las Figuras 2 y 3 que la principal diferencia entre las dos soluciones propuestas es que la estrategia adoptada por recocido simulado logra una reducción de kilómetros al no recolectar tambos agrupados por cercanía exclusivamente.

Para analizar el grado de dispersión de los agrupamientos de tambos que recolecta cada camión, se utilizó el índice de Davies-Bouldin (DBI) (Davies y Bouldin, 1979), este índice es una métrica utilizada para evaluar la calidad de los algoritmos de agrupamiento (clustering) en aprendizaje automático. El DBI mide qué tan bien están separados los grupos y qué tan compactos son internamente, y se define como el promedio de la similitud máxima entre cada grupo y su grupo más similar. En una agrupación ideal, el valor del DBI es cero. Matemáticamente, se formula en la Ec. 2.

$$DBI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max_{j \neq i} \left(\frac{S_i + S_j}{M_{ij}} \right) \quad (2)$$

Donde:

- n es el número de grupos.
- S_i es la dispersión dentro del grupo i , que mide qué tan compacto es el grupo.
- M_{ij} es la separación entre los grupos i y j , que mide qué tan distantes están.

La dispersión intra-cluster S_i para cada grupo i se calcula como:

$$S_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} d(x, \mu_i) \quad (3)$$

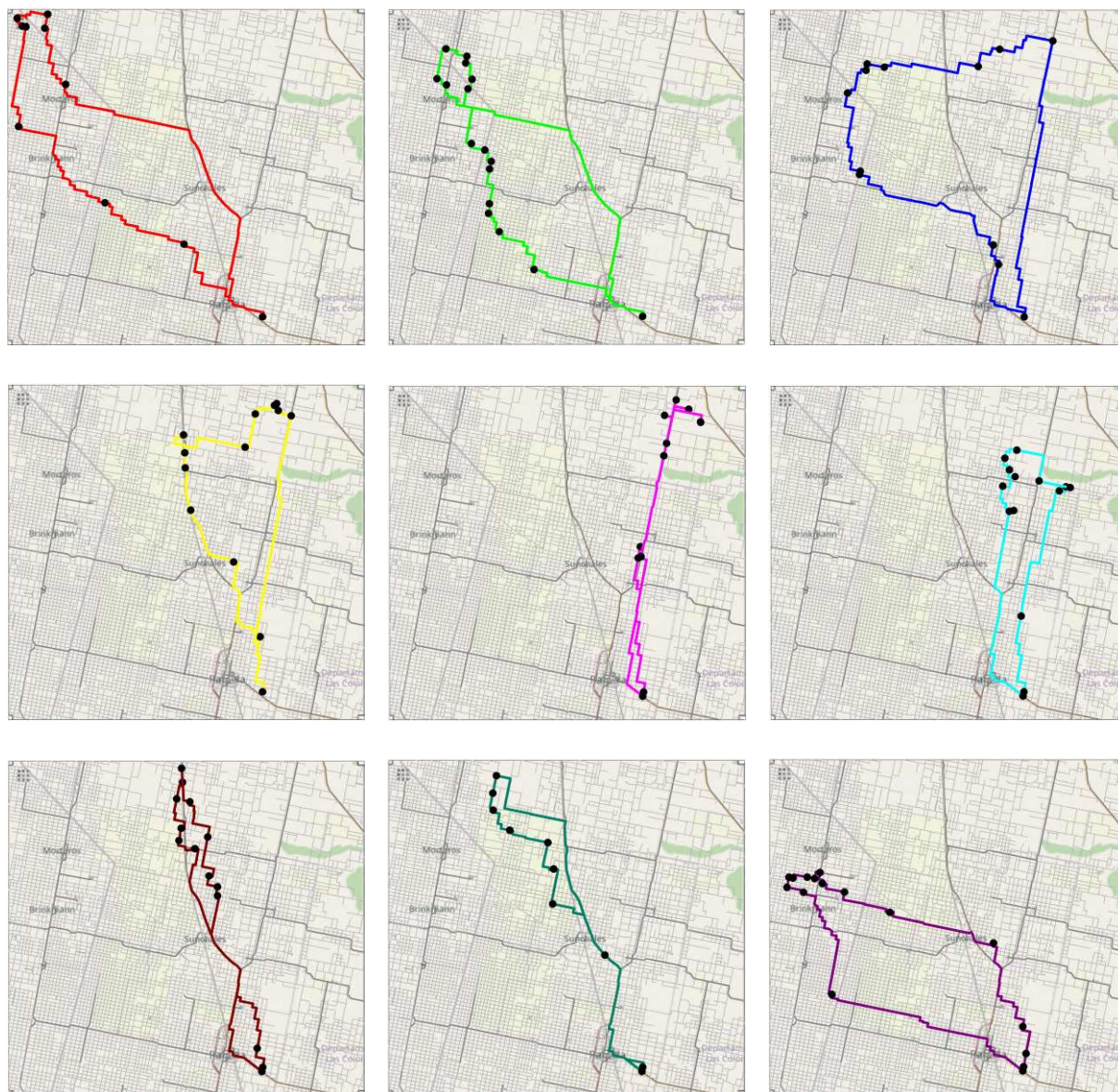


Figura 3: Recorridos de nueve camiones de la solución optimizada con Recocido Simulado. En distintos colores se indican los caminos que recorre cada camión, y con puntos negros se indica la localización de los tambos donde ese camión recolecta leche.

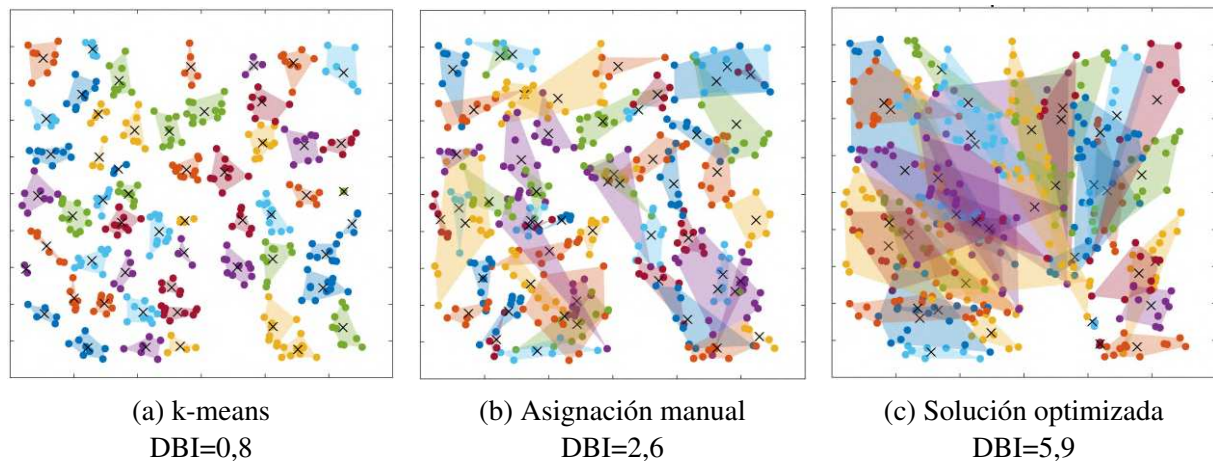


Figura 4: Agrupamiento de los tambos asignados a cada camión en diferentes soluciones.

Este índice se calculó para tres agrupamientos de los 400 tambos tal como se ilustra en la Figura 4, a continuación se detalla cada uno:

a) En primer lugar se calculó el DBI sobre el agrupamiento de tambos obtenido de la aplicación de un algoritmo de agrupamiento utilizado en el campo del aprendizaje automático y la minería de datos denominado k-means. Su objetivo principal es dividir un conjunto de datos en k grupos o clústeres, para este caso $k = 55$. El DBI obtenido tiene un valor de 0,8. El resultado de esta técnica de agrupamiento se puede ver en la Figura 4a. Cabe destacar que en este caso no se tuvieron en cuenta las restricciones del problema. Esto significa que no se consideró la cantidad de litros producidos por los tambos en cada agrupamiento, y en muchos casos un solo camión no podría recolectar la leche cruda del conjunto de tambos en un solo viaje.

b) En segundo lugar, se calculó el DBI para la asignación manual de tambos. Esta es la forma en que tradicionalmente se realiza el agrupamiento en la industria y en este caso si se considera que la leche cruda de cada agrupamiento pueda ser recolectada por un camión. El resultado de esta solución se expone en la Figura 4b y arroja un valor de DBI de 2,6.

c) Por último, se evaluó el DBI de los agrupamientos obtenidos al optimizar el caso con recocido simulado con el objetivo de reducir la distancia total recorrida por los camiones en su conjunto. El resultado se observa en la Figura 4c y proporciona un valor de DBI de 5,9. En este caso también se contempló que la cantidad de leche cruda producida por cada agrupamiento de tambos pueda ser recolectada por un camión.

4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permitió reducir en un 34 % la distancia total recorrida para recolectar la leche de los 400 tambos. Además, con la misma estrategia de minimizar distancias se logró aumentar la utilización de los camiones del 70 % establecido para la asignación manual a un 96 % con la asignación optimizada. Considerando que se ha dejado un margen de 2,7 % de la capacidad de los tanques para cubrir posibles variaciones diarias en la producción de leche, la capacidad ociosa prácticamente desaparece en la solución propuesta.

Este mayor aprovechamiento de los camiones, deja en evidencia que se puede prescindir del 31 % de los camiones que se emplean actualmente. Pasando de tener una flota de 55 a 38 camiones en servicio para recolectar toda la leche. Si bien no es objeto de estudio de este trabajo, esta mejora en la eficiencia trae consigo grandes beneficios económicos al proceso logístico. Y a pesar de este mayor aprovechamiento de los vehículos, cada uno de los 38 camiones empleados en la solución optimizada recorre en promedio 5 % menos distancia que en la solución obtenida por asignación manual.

Las ventajas introducidas por la solución propuesta por recocido simulado también queda de manifiesto al analizar la eficiencia entre los litros recolectados y los kilómetros recorridos, pasando 95,5 litros/km a 145,3 litros/km, lo que representa una mejora del 52 % en la eficiencia global de la logística.

La herramienta desarrollada tiene un gran potencial para mejorar la logística actual de las empresas lácteas en su recolección de leche cruda, el desafío más grande que se debe afrontar es el cambio de paradigma donde se terceriza el transporte. Esto impide poder realizar cambios que permitan adaptarse ágil y eficientemente a los cambios en las condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por financiar esta investigación en el marco del proyecto con Código ASECRA0008637.

REFERENCIAS

- Bonetti C., Puccini G., Bertone S., Bianchotti J., y Denardi M. Optimización de la logística en el transporte de leche mediante recocido simulado: un enfoque eficiente para la distribución láctea. *Mecánica Computacional.*, 40:1087–1096, 2023.
- Davies D.L. y Bouldin D.W. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1:224–227, 1979.
- Kirkpatrick S., Gelatt J., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science.*, 220:671–680, 1983.
- López-Castro L., Solano-Charris E., y Pagés-Bernaus A. Environmental approach for the design of raw milk collection routes with a heterogeneous fleet. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211:107995, 2023.
- Marinakis Y. y Migdalas A. Annotated bibliography in vehicle routing. *Operational Research*, 7:27–46, 2007.
- Paredes-Belmar G., Marianov V., Bronfman A., Obreque C., y Lüer-Villagra A. A milk collection problem with blending. *Transportation Research*, 94:26–43, 2016.
- Paredes-Belmar G., Montero E., y Leonardini O. A milk transportation problem with milk collection centers and vehicle routing. *ISA Transactions*, 122:294–311, 2022.
- Yeun L., Ismail W., Omar K., y Zirour M. Vehicle routing problem: Models and solutions. *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 4:205–218, 2008.