

## OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA EN EL TRANSPORTE DE LECHE MEDIANTE RECOCIDO SIMULADO: UN ENFOQUE EFICIENTE PARA LA DISTRIBUCIÓN LÁCTEA

### OPTIMIZING LOGISTICS IN MILK TRANSPORT BY SIMULATED ANNEALING: AN EFFICIENT APPROACH TO DAIRY DISTRIBUTION

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

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

**Palabras clave:** Optimización, Logística, Transporte de leche, Planificación de la producción, Recocido simulado

**Resumen.** La logística destinada al transporte de leche desde los establecimientos primarios de producción hacia los centros industriales de manufactura en Argentina ha sido tradicionalmente gestionada de forma empírica, es decir, basándose en la experiencia previa o en la intuición. Pero la creciente demanda de eficiencia por parte de las industrias para mantener su competitividad, sumando a la complejidad y vulnerabilidad que presenta el entramado de rutas y caminos rurales en nuestro país, hacen necesario reconsiderar la manera de gestionar esta logística. Esta complejidad exige la implementación de herramientas de optimización. En el presente trabajo se presenta un método computacional que permite establecer los recorridos óptimos de un conjunto de camiones para recolectar la leche de una agrupación de tambos y llevarla a un conjunto de plantas manufactureras. Estos recorridos reducen las distancias transitadas y garantizan el abastecimiento de materia prima que cada planta manufacturera necesita. Se emplea el algoritmo de recocido simulado como procedimiento de optimización, y se aplica a un caso basado en las características y desafíos que fueron identificados en dos industrias lácteas ubicadas en la región centro de la provincia de Santa Fe.

**Keywords:** Optimization, Logistics, Milk transport, Production planning, Simulated annealing

**Abstract.** The logistics for transporting milk from primary production facilities to industrial manufacturing centers in Argentina has traditionally been managed empirically, that is, relying on prior experience or intuition. However, the growing demand for efficiency from industries to maintain competitiveness, coupled with the complexity and vulnerability of the rural road network in our country, requires a reevaluation of how this logistics is managed. This complexity calls for the implementation of optimization tools. In this paper, a computational method is presented to establish optimal routes for a fleet of trucks to collect milk from a group of dairy farms and deliver it to a set of manufacturing plants. These optimized routes reduce the distance traveled and ensure the supply of raw materials that each manufacturing plant requires. The simulated annealing algorithm is employed as an optimization procedure and is applied to a case based on the characteristics and challenges identified in two dairy industries located in the central region of the province of Santa Fe.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector lácteo argentino posee un enorme potencial de crecimiento. Para satisfacer la demanda internacional es necesario elevar estándares de calidad de la leche cruda y la eficiencia de los productos industrializados. Sin embargo, los problemas de infraestructura de caminos y servicios sumado a una la planificación sumamente pragmática y empírica en la recolección de la materia prima, dificultan la persecución de estas exigencias del mercado.

De acuerdo con los resultados del relevamiento realizado por la Secretaría de Gobierno de Agroindustria de la Nación para el período comprendido entre los años 2016 y 2018 ([Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2019](#)), existen 9.249 tambos que abastecen a 685 plantas industriales. Las mismas procesan alrededor de 28,5 millones de litros de leche por día. El relevamiento también indica que existen 1.800 transportes que llevan la leche cruda a las plantas industriales. Estos camiones recorren, en promedio, un total 231.188 km por día, de los cuales el 42 % son caminos de tierra y el resto de son asfalto (58 %).

A nivel provincial, Santa Fe es una de las cuencas lecheras más importantes del país puesto que contribuye con el 25 % del volumen nacional de leche y localiza el 15 % de las industrias ([Provincia de Santa Fe, 2022](#)). Esta importancia en la cadena láctea contrasta dramáticamente con su debilidad en la logística e infraestructura de caminos. Aunque ha sido extensamente demostrado que una adecuada logística posee una incidencia significativa en los costos del producto, muchas de las empresas lácteas de la región todavía basan sus decisiones en criterios subjetivos para el diseño de las rutas de los camiones. Y lo que atenta aún más contra la eficiencia en la recolección de leche es que se le asignan un conjunto de tambos prefijados a camiones que son tercerizados y trabajan de manera independiente, funcionando con una capacidad ociosa promedio del orden del 30 % de la capacidad total que tienen en sus tanques. Para dar solución a esta problemática es necesario un cambio de paradigma en la logística que en otros países ya está marcando la forma de trabajar ([Paredes-Belmar et al., 2016, 2022](#)). En este nuevo paradigma los camiones no trabajan de modo independiente, sino que son gestionados en su conjunto.

En particular, el transporte diario de la leche cruda es un problema logístico que debe tener en cuenta no solo la distancia y dificultad de acceso a los tambos, sino también la producción de leche correspondiente a ese día, asignando el camión mas conveniente a cada tambo para incrementar la eficiencia de la logística en su totalidad. Además, en el caso de empresas con varias plantas de producción se debe planificar la descarga de leche en cada establecimiento manufacturero para cumplir con sus respectivas planificaciones de producción. Para replantear la logística del sector lácteo en Argentina, se debe tener en cuenta también que en el país conviven grandes, medianas y pequeñas empresas que presentan diferencias marcadas respecto de la tecnología utilizada. El impacto de todas estas vulnerabilidades de la cadena láctea en la eficiencia productiva se puede reducir significativamente mediante el uso de técnicas de investigación operativa.

La determinación de la ruta óptima para el transporte de leche es un importante problema que aparece en muchos sistemas de distribución y/o aprovisionamiento, y se conoce en la literatura científica como Vehicle Routing Problem (VRP) ([Yeun et al., 2008](#); [Laporte, 1992](#); [Marinakis y Migdalas, 2007](#)). Básicamente, consiste en diseñar la ruta óptima desde un punto de partida a un conjunto de puntos geográficamente dispersos sobre una red de caminos. Desde que fue propuesto por Dantzig y Ramser en 1959 ([Dantzig y Ramser, 1959](#)), cientos de publicaciones han estudiado distintas variantes del problema que tienen en cuenta, por ejemplo, la capacidad de los vehículos (CVRP), o el intervalo de tiempo dentro del cual los clientes deben ser atendidos (VRPTW). En la aplicación de VRP para la recolección de leche, las rutas deben ser diseñadas

de tal manera que (a) cada punto sea visitado una sola vez por un vehículo de la flota, (b) todas las rutas comiencen y terminen en los depósitos de camiones, y (c) las demandas totales de todos los puntos en una determinada ruta no debe exceder la capacidad del vehículo.

Recientemente, se han desarrollado variantes del VRP que capturan más fielmente los problemas prácticos de distribución que el modelo básico. En particular, esas variantes tienen en cuenta los múltiples depósitos disponibles, los viajes realizados por los vehículos, los diferentes tipos de vehículos u otras restricciones operativas (Bräys et al., 2002; Butler et al., 1997; Yeun et al., 2008). Desde el punto de vista matemático, el VRP pertenece a la clase de problemas de optimización combinatoria con múltiples restricciones que puede resolverse de manera exacta, y en un tiempo de cómputo razonable, solo para un número muy pequeño de clientes (Desrochers et al., 1992; Fisher et al., 1997). Sin embargo, para situaciones reales los métodos exactos no pueden aplicarse puesto que el tiempo de cómputo crece exponencialmente. Debido a su enorme interés en la planificación de los sistemas de distribución y en logística, se han realizado intensos esfuerzos de investigación durante varias décadas, lo que ha facilitado el desarrollo de modelos matemáticos, y conducido a diferentes estrategias de solución (Bräysy y Gendreau, 2005a,b).

Actualmente, las investigaciones se concentran en desarrollar técnicas de solución aproximadas. Los denominados métodos metaheurísticos han sido diseñados para que sean capaces de producir soluciones aproximadas a problemas reales en un tiempo de cómputo viable. Uno de estos métodos es el denominado recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983; Czech y Czarnas, 2002) y es el que se emplea en el presente trabajo.

## 2. MÉTODOS

### 2.1. Formulación del problema

Dado un conjunto de camiones  $C$ , un conjunto de tambos  $T$ , un conjunto de plantas manufactureras  $P$ , y un conjunto de recorridos  $R$ , el problema de optimización consiste en determinar el orden de recolección de tambos y la planta manufacturera de destino para cada camión, de manera que se minimice la distancia total recorrida por todos los camiones. Además, se deben cumplir las restricciones de capacidad de los tanques de los camiones, así como las restricciones de cantidad de leche a entregar en cada planta manufacturera. La distancia total que recorre cada camión  $c_i$  en su recorrido  $r_i$  se mide en kilómetros y se denota como  $D(r_i)$ .

Formalmente, se busca minimizar la función de costo total  $F$  definida como la suma de las distancias recorridas por todos los camiones  $N_C$ :

$$F = \sum_{i=1}^{N_C} D(r_i) \quad (1)$$

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  $p_i$ .

Las variables de decisión se establecen mediante un vector de números enteros  $r_i$ , que indica el orden de recolección de tambos y la entrega a la planta  $p_i$  para el camión  $c_i$ . Los recorridos propuestos deben cumplir con la condición de que la suma total de litros producidos por todos los tambos del recorrido asignado a un camión no exceda la capacidad de sus tanques. En cada iteración, el orden de recorridos  $r_i$  será modificado (perturbado) para obtener una nueva solución, que se evaluará de acuerdo a la función de costo  $F$ , siempre que dicha solución no exceda la capacidad de los tanques. Se presentan condicionamientos respecto a las plantas donde se descarga la leche para poder cumplir con sus respectivas planificaciones de producción previstas.

## 2.2. Recocido Simulado

El problema de enrutamiento de vehículos es de naturaleza combinatoria, lo que requiere la aplicación de algún algoritmo de optimización metaheurístico para obtener una aproximación al óptimo global. En el presente trabajo se implementa el algoritmo estocástico conocido como recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983). Este algoritmo se basa en una estrategia de mejora iterativa que comienza con una solución inicial y luego explora soluciones, dentro de su entorno, en busca de aquellas con menor costo.

La particularidad introducida por recocido simulado consiste en aceptar, con una probabilidad distinta de cero, soluciones de mayor costo lo que le permite escapar de mínimos locales, aunque esto no garantiza llegar al mínimo global. El parámetro que permite controlar la aceptación de soluciones de mayor costo se llama temperatura. En este esquema, el recocido simulado comienza con una solución factible  $r_{cur}$  a una temperatura inicial  $T_0$ . Luego se genera una nueva solución  $r_{new}$  perturbando la solución inicial. Si la nueva solución tiene un costo  $F(r_{new})$  menor al costo de la solución factible  $F(r_{cur})$ , la solución  $r_{new}$  es aceptada como la solución actual. Sin embargo, si  $r_{new}$  tiene un costo superior, la nueva solución tiene una probabilidad no nula de ser aceptada de acuerdo a la probabilidad de Boltzmann:  $P = \exp[(-F(r_{new}) + F(r_{cur}))/T_i]$ . Donde el parámetro temperatura  $T_i$  controla la probabilidad de aceptación de soluciones de mayor costo en la iteración  $i$ . Luego de un número fijo de iteraciones, la temperatura es gradualmente disminuida. Para explorar distintas soluciones, el método de perturbación modifica aleatoriamente la cantidad y el orden de los tambos que recorre cada camión, así como también la planta manufacturera en la que el camión descarga la leche. De esta manera, el algoritmo busca entre las distintas configuraciones de recorridos, aquellas que proveen menor costo.

## 2.3. Caso de estudio

El caso de estudio consta de cuarenta tambos que fueron numerados como se indica en la Fig. (1), tres plantas industriales (indicadas en verde), y un estacionamiento (indicado en color azul). Se modelan 8 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 y trasladarla a las plantas industriales.

La capacidad mínima  $L_{\min}$  y máxima  $L_{\max}$  que admiten las plantas se indican en la Tabla 1. Se observa que en las plantas 1 y 2 la diferencia entre el mínimo y el máximo que pueden recibir

es de 1000 y 10000 litros respectivamente, lo cual indica que su planificación de producción no tolera grandes variaciones en la leche que puede recepcionar. En cambio la planta 3 tiene un amplio margen en cuanto a la leche que puede recibir, esto puede deberse tanto a una planificación de producción mas versátil, como a una gran capacidad de almacenamiento. La producción diaria de cada tambo ( $t$ ) se indica en la Tabla 2.

$p_i$	$L_{\min}$ (l)	$L_{\max}$ (l)
1	25000	26000
2	40000	50000
3	1000	100000

Tabla 1: Capacidad de recepción de leche en cada planta ( $p_i$ ).

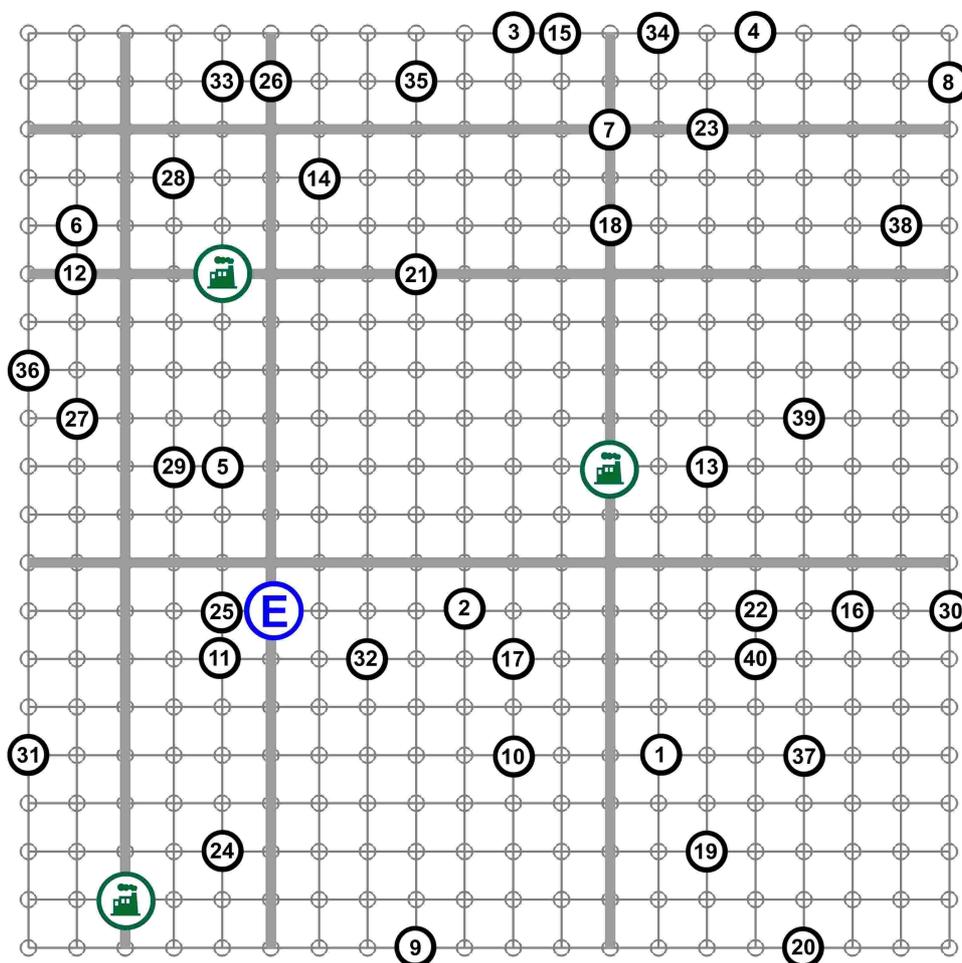


Figura 1: Caso de estudio. E denota el estacionamiento. En color verde se indican las plantas industriales.

En el modelo se representa también de manera simplificada las dos vías principales de transporte: rutas y caminos de tierra. En la Fig. (1) se indica con trazo gris fino los caminos de tierra y con trazo gris grueso las rutas. Se ponderó un 50 % más la distancia recorrida en caminos de tierra respecto a las rutas para contemplar las desventajas comparativas de los mismos.

$t$	$L$ (l)	$t$	$L$ (l)
1	1500	21	800
2	4000	22	600
3	900	23	4000
4	2000	24	2500
5	6500	25	2700
6	1200	26	3100
7	1300	27	1600
8	2100	28	3900
9	3400	29	5100
10	1100	30	3000
11	8000	31	1400
12	2400	32	1100
13	2500	33	1800
14	1900	34	1300
15	1200	35	3300
16	600	36	2800
17	700	37	1800
18	1700	38	2700
19	5200	39	4000
20	1600	40	3200

Tabla 2: Producción diaria de leche ( $L$ ) en litros de cada tambo ( $t$ ).

Para cada uno de los ocho camiones se adopta una capacidad de 18.000 litros. Es importante señalar que el diseño del caso de estudio toma como referencia un relevamiento propio de la situación actual de empresas de la región centro de Santa Fe. El modelo propuesto, por lo tanto, integra las problemáticas principales identificadas en este contexto.

### 3. RESULTADOS

El resultado de la aplicación de la metodología propuesta utilizando el algoritmo de recocido simulado al caso de estudio se muestra en la Fig. (2), y en la Fig. (3) se detallan los mejores recorridos encontrados para todos los camiones que recolectan leche.

La solución optimizada determina que lo más conveniente para reducir la distancia total recorrida es que el camión número 1 no salga a recolectar leche, ya que es posible transportar toda la leche producida por los tambos sin necesidad de utilizar los ocho camiones.

En la Fig. (3a) se expone en un trazo de color rojo el recorrido del camión 2, el cual parte desde el estacionamiento y recolecta los tambos 33, 3, 15, 34, 23 y 7 (en ese orden). Luego descarga en planta 1, que es la que se indica mas a la derecha en la figura, y finalmente regresa al estacionamiento. Cada tramo de la cuadrícula donde se armó el caso de estudio tiene una longitud de 1 kilómetro, por lo que la distancia total que recorre el camión 2 es de 44 km. Se observa en este resultado como el algoritmo prioriza la elección de rutas y evita, siempre que sea posible, la elección de caminos de tierra. Esto se logra gracias a la ponderación descrita en 2.3. En estos ocho tambos el camión 2 recolecta un total de 10500 litros de leche.

El mejor recorrido encontrado para el camión 3 se indica en la Fig. (3b) en color verde, el camión sale del estacionamiento, pasa a recolectar la leche de 8 tambos: 32, 13, 38, 8, 4, 18,



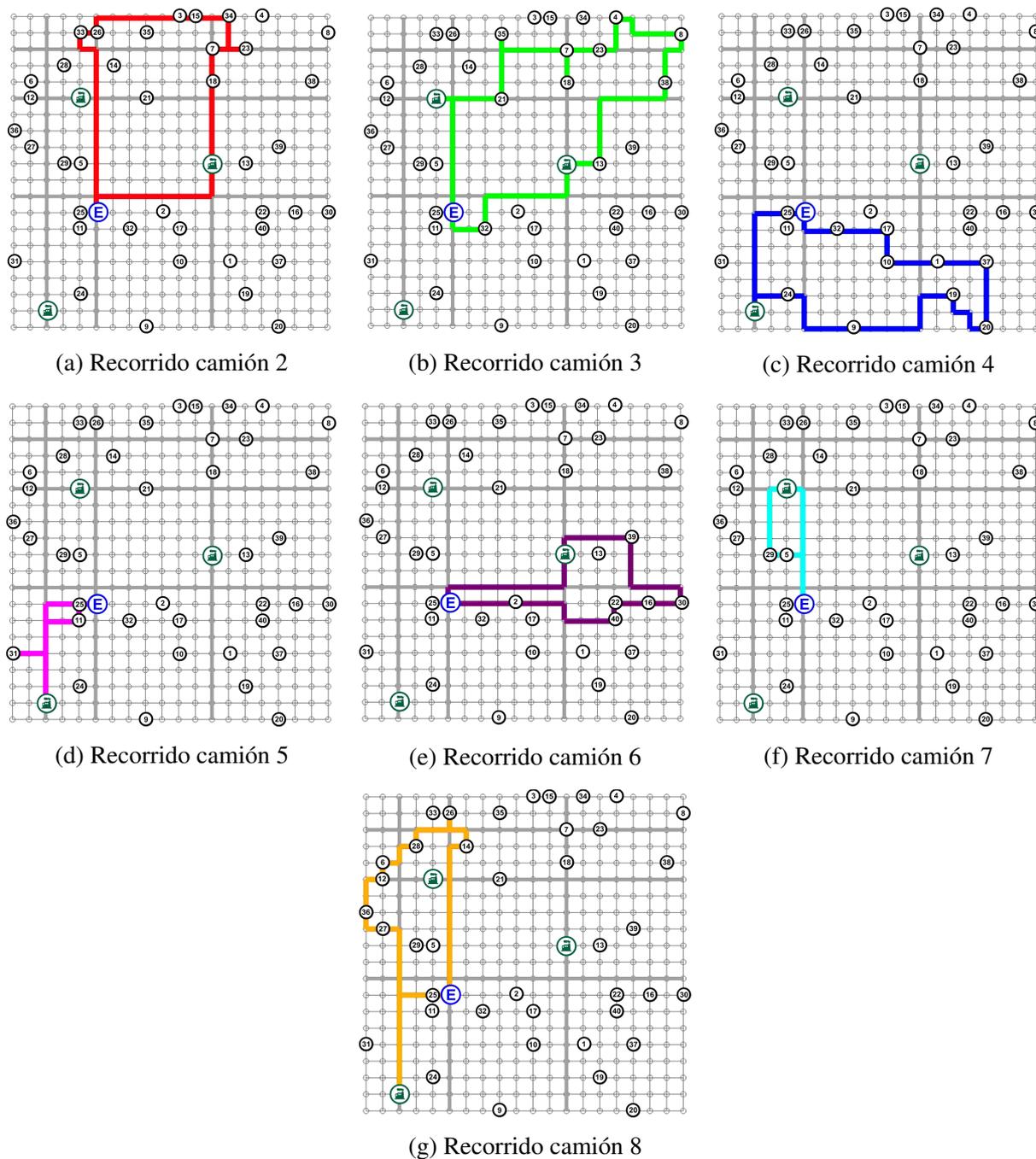


Figura 3: Recorrido de cada camión en la solución más eficiente encontrada

del estacionamiento, pasa por los tambos 14, 26, 28, 6, 12, 36 y 27. Descarga en la planta 2 un total de 16700 litros de leche y vuelve al estacionamiento. En total recorre 46 km.

La suma de las distancias recorridas por todos los camiones es de 278 km. Con la ponderación aplicada a los caminos de tierra, la mejor solución encontrada tiene un valor de  $F = 342$  en la función de costo total (ver Ec. (1)).

Se observa que en ningún caso la leche recolectada supera la capacidad de los camiones. Otro condicionamiento respecto a la cantidad de leche recolectada, es abastecer al menos con lo mínimo requerido a cada planta, y no excederse de lo máximo que puede recibir esa planta. Sumando los litros descargados en cada planta en esta solución optimizada, se obtiene un total de 25900 litros para la planta 1, 46800 litros para la planta 2 y 27800 litros para la planta 3. Se puede corroborar con los valores de la Tabla 1 que estas cifras cumplen con lo requerido por la planificación de la producción de cada planta para ese día.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para mejorar la eficiencia logística en el transporte de leche mediante la aplicación del algoritmo recocido simulado. El modelo desarrollado permite determinar las rutas óptimas para un conjunto de camiones encargados de recolectar leche de una serie de tambos y entregarla a las plantas manufactureras, al mismo tiempo que garantiza el cumplimiento de las restricciones de cantidad mínima y máxima de materia prima necesaria para cada industria.

Con la implementación de este modelo se logra reducir la flota de camiones de ocho a siete para llevar a cabo la misma tarea de recolección. El caso de estudio se diseñó inicialmente con ocho camiones, manteniendo una ocupación de los tanques de los camiones en torno al 70 %, en línea con los estándares observados en las empresas consultadas. Sin embargo, la aplicación del método de optimización propuesto permitió realizar la misma cantidad de trabajo de recolección prescindiendo de uno de los camiones, lo que resultó en un aumento en la utilización de los tanques de los camiones hasta alcanzar un 80 %. Es importante destacar que la eliminación de un camión conlleva numerosos beneficios adicionales en términos de costos, consumo de combustible, mantenimiento, tiempos de descarga y limpieza, así como en la reducción de la huella de carbono, entre otros aspectos. Estos efectos positivos adicionales hacen que la optimización de la flota de camiones tenga un impacto significativo en la eficiencia y sostenibilidad de la operación logística.

La metodología propuesta permite abandonar una estructura rígida en el diseño de los recorridos de leche, permitiendo planificar recorridos en tiempo real de acuerdo a los requerimientos específicos de leche de cada planta, considerando su planificación de la producción. Esta agilidad permite responder a las demandas diarias de las empresas que cuentan con más de una planta manufacturera.

Se observa en los resultados obtenidos que algunos recorridos no resultan intuitivos, por lo que sería muy difícil encontrar estas soluciones con el método empírico con el que trabajan actualmente las empresas lácteas en la región centro de la provincia de Santa Fe.

La metodología desarrollada tiene un gran potencial que posibilita enriquecer el modelo considerando condiciones variables de la operatoria diaria. Por ejemplo, es de gran utilidad poder calcular recorridos óptimos en condiciones climáticas de lluvia, donde muchos caminos de tierra se tornan intransitables.

En trabajos posteriores se enriquecerá el análisis incorporando huella de carbono en el estudio, considerando no solo las distancias recorridas, sino también una flota de vehículos con capacidades heterogéneas. Además, se deberá tener en cuenta la carga transportada por los ca-

miones en cada kilómetro recorrido puesto que esto condiciona directamente el consumo de combustible, y consecuentemente, impacta en la huella de carbono. Nuevas investigaciones encontradas en bibliografía comienzan a incorporar estos aspectos para modelar huella de carbono, y en algunos de estos trabajos se obtienen resultados con menor huella de carbono a pesar de recorrer mayores distancias (López-Castro et al., 2023).

## AGRADECIMIENTOS

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

## REFERENCIAS

- Bräys O., Gendreau M., Hasle G., y Løkketangen A. A survey of rich vehicle a routing models and heuristic solution techniques. *Technical report, SINTEF*, 2002.
- Bräysy O. y Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, part i: Route construction and local search algorithms. *Transportation Science.*, 39:104–118, 2005a.
- Bräysy O. y Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, part ii: Metaheuristics. *Transportation Science.*, 39:119–139, 2005b.
- Butler M., Williams P., y Yarrow L. The two-period travelling salesman problem applied to milk collection in ireland. *Computational Optimization and Applications*, 7:291–306, 1997.
- Czech Z. y Czarnas P. Parallel simulated annealing for the vehicle routing problem with time windows. *10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing*, páginas 376–383, 2002.
- Dantzig G. y Ramser J. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6:80–91, 1959.
- Desrochers M., Desrosiers J., y Solomon M. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operational Research.*, 40:342–354, 1992.
- Fisher M., Jörnsten K., y Madsen O. Vehicle routing with time windows – two optimization algorithms. *Operational Research.*, 45:488–498, 1997.
- Kirkpatrick S., Gelatt J., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science.*, 220:671–680, 1983.
- Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59:345–358, 1992.
- 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.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. *Estado de situación de la industria láctea argentina para la definición de políticas públicas 2016-2018*. Argentina, 2019.
- 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.
- Provincia de Santa Fe. Lechería y política láctea. *Informe del Gobierno de la Provincia de Santa Fe*, <https://www.santafe.gob.ar>, 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.