

Optimización de Recorridos para el Transporte de Leche mediante Recocido Simulado.

Route Optimization for Milk Transportation through Simulated Annealing.

Presentación: 8/09/2023

Santiago Gariboldi

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina
santigariboldi@gmail.com

Augusto López Airaudó

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina
augustolopezairaudó@gmail.com

Bianca Culasso

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina
biancaculasso@hotmail.com

Resumen

La eficiencia en la recolección y distribución de leche desempeña un papel fundamental en la industria láctea. Este trabajo busca optimizar los recorridos involucrando hasta diez camiones para recoger la leche de cincuenta tambos y entregarla en una planta de procesamiento. Para abordar este complejo problema se aplica el algoritmo metaheurístico conocido como Recocido Simulado. La solución encontrada mejora la eficiencia del proceso en términos de distancia recorrida y capacidad ocupada por tanque; adicionalmente, esta contribuye a reducir el impacto ambiental por emisiones de carbono, prescindiendo de la utilización de dos camiones. Para analizar la mejor solución encontrada los resultados se comparan con una solución empírica basada en la metodología utilizada en las industrias de la zona.

Palabras clave: Recolección de Leche; Problema de Enrutamiento de Vehículos; Huella de Carbono; Recocido Simulado

Abstract

Efficiency in milk collection and distribution plays a fundamental role in the dairy industry. This work aims to optimize the routes involving up to ten trucks for collecting milk from fifty dairy farms and delivering it to a processing plant. To address this complex problem, the metaheuristic algorithm known as Simulated Annealing is applied. The solution found improves the process efficiency in terms of distance traveled and tank capacity occupied. Additionally, it contributes to reducing the environmental impact through carbon emissions, eliminating the need for two trucks. To analyze the best solution found, the results are compared with an empirical solution based on the methodology used in the local industries.

Keywords: Milk Recollection; Vehicle Routing Problem; Carbon Footprint; Simulated Annealing

Introducción

En la actualidad la tecnología posee un rol clave en el éxito de las organizaciones. Su implementación en los distintos eslabones productivos de una empresa puede generar mejoras significativas en la eficiencia de la distribución y el aprovechamiento de los recursos, lo que impacta fuertemente en los resultados obtenidos. La logística, aunque no añade valor directo a los productos y servicios, juega un papel fundamental en la cadena de valor de las organizaciones. Por esta razón se busca optimizarla mediante el uso de herramientas tecnológicas, las cuales tienen el potencial de reducir costos y mejorar la eficiencia de los procesos. La gestión y el análisis de los datos involucrados en este proceso permiten optimizar la producción y mejorar la toma de decisiones, e incluso, disminuir la huella de carbono, lo que es esencial en un contexto de creciente conciencia ambiental.

En Argentina, la industria láctea ocupa un lugar de gran relevancia en la economía del país, siendo uno de los pilares en la agroindustria. Existen 9.249 tambos que abastecen a 685 plantas industriales, donde se procesan 25,8 millones de litros de leche al día (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2019). La producción de leche y sus derivados no sólo genera empleo, sino también permite introducirse en el mercado internacional. Sin embargo, el potencial del sector se ve afectado por la ineficiencia en la logística de la materia prima.

En el ámbito del transporte se enfrentan diversas dificultades que merecen ser mencionadas. Una de ellas es la extensión considerable de los recorridos, tanto en términos de distancia como de tiempo. Esta extensión conlleva a un uso ineficiente de los camiones, que en promedio operan con una capacidad ociosa del 30%. Ambos factores, las largas distancias y la subutilización de los vehículos, tienen un impacto directo en el aumento de la huella de carbono. Además, la ineficiencia del proceso se agrava debido a que los recorridos son tercerizados y se gestionan de manera independiente. Estos recorridos se llevan a cabo con base en tambos preestablecidos, lo que limita la flexibilidad y optimización de las rutas. Para abordar esta problemática es necesario un cambio de paradigma en la logística, un enfoque que ya está siendo adoptado en otros países y que está transformando la forma de trabajar (Paredes-Belmar, 2016, 2022). En este nuevo paradigma, los camiones no operan de manera independiente, sino que son gestionados de manera coordinada y colaborativa.

Esta incertidumbre a la hora de planificar las rutas y gestionar una flota de camiones tiene una gran incidencia en la eficiencia de los recorridos, así como en la calidad de la leche y los costos operativos. Estos factores repercuten considerablemente en el producto final y su costo para el consumidor. Algunos autores (Paredes-Belmar, et al, 2022) han abordado una variante del problema de enrutamiento de vehículos (problema VRP) mediante Programación Lineal de Enteros Mixtos. El caso que se investiga involucra un total de 472 tambos y 91 camiones. Debido a la complejidad intrínseca del problema, incluso para una cantidad relativamente pequeña de tambos, los autores utilizan un enfoque de 3 etapas de iteración local.

En el presente trabajo se desarrollará una metodología para la aplicación de una herramienta metaheurística para optimizar el proceso de recolección de leche en los tambos y su posterior transporte a la planta de leche cruda. En particular, se utilizará un algoritmo de optimización metaheurística conocido como recocido simulado (Kirkpatrick, et al, 1983). El mismo se emplea para resolver problemas de optimización, tanto combinatorios como continuos. Su enfoque consiste en buscar una solución óptima, o cuasi-óptima, en un espacio de búsqueda amplio y posiblemente complejo. Este algoritmo es especialmente útil cuando se enfrentan problemas de optimización en los que la búsqueda de la solución exacta puede ser computacionalmente costosa o impracticable, permitiendo encontrar soluciones de alta calidad en un tiempo de cómputo razonable.

Metodología

a) *Formulación del problema*

El problema de optimización consiste en determinar los recorridos (r) que realizarán los camiones (c), minimizando el total de kilómetros que recorre cada camión ($Q_{KM}(c)$) por cada 1000 litros de leche que recolecta ($mL(c)$).

$$f(r) = \frac{\sum_{c=1}^{10} Q_{KM}(c)}{\sum_{c=1}^{10} mL(c)} \quad [1]$$

La función objetivo del problema $f(r)$ es una medida simplificada del impacto del transporte de leche en la huella de carbono, teniendo en cuenta su principal variable, la distancia. Las variables de decisión del problema se establecen mediante un vector de números enteros (r) para indicar los tambos a recolectar que son asignados a cada camión (diez camiones en total). 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. Para modelar el problema, se establecen diez vectores cada uno de los cuales representa un recorrido que determina el orden en que deben ser visitados los tambos para cada camión. En cada iteración este orden será modificado (perturbado) para obtener una nueva solución, que será evaluada de acuerdo a la Ecuación [1], siempre que dicha solución no exceda la capacidad de los tanques.

b) Caso de estudio

El caso de estudio consta de cincuenta tambos numerados (indicados en color rojo) como se muestra en la Figura 1, una planta industrial (indicada en color azul), y un estacionamiento (indicado en color verde). Se modelan 10 camiones, cada uno de los cuales comenzará y finalizará su recorrido en el estacionamiento. En el trayecto deben recolectar la leche de los todos los tambos asignados en cada solución y, finalmente, trasladarla a la planta industrial.

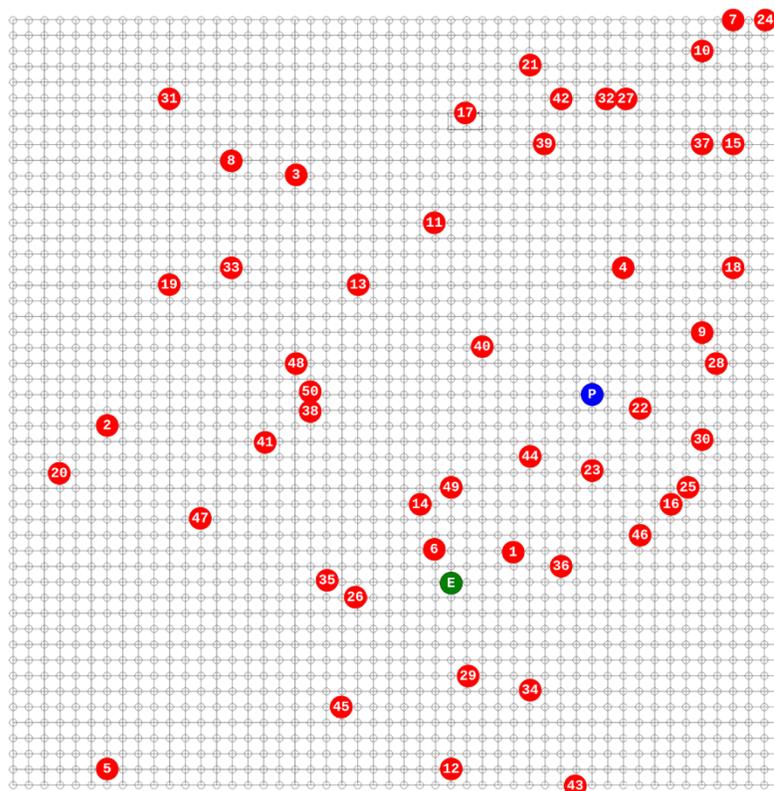


Figura 1 Caso de estudio compuesto de 50 tambos, 1 estacionamiento y 1 planta industrial

La cantidad de tambos que visite un camión dependerá de la capacidad de producción diaria del mismo, con una media de 2518,6 litros comprendida entre valores mínimos y máximos de 503 litros y 7.853 litros, respectivamente. Por su parte, los diez camiones poseen una capacidad total de 18.000 litros y una capacidad efectiva del 97,3% del total, fijada en 17.500 litros, para contemplar las posibles desviaciones diarias en la producción de los tambos. 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 en la zona. El modelo propuesto, por lo tanto, integra los aspectos principales identificados en este contexto.

c) Recocido Simulado

El problema de enrutamiento de vehículos es de naturaleza combinatoria, por lo cual, para su resolución es necesario el uso de algún algoritmo de optimización metaheurístico que provea una aproximación al óptimo global. En el presente trabajo se implementa el algoritmo estocástico conocido como recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983). Este algoritmo está basado en una generalización de la estrategia del progreso iterativo, la cual comienza con una solución inicial y luego busca, dentro de su

entorno, otra solución de menor costo. La generalización introducida por recocido simulado implica aceptar, con una probabilidad distinta de cero, una solución de mayor costo para 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 U_{cur} a una temperatura inicial T_0 . Luego se genera una nueva solución U_{new} perturbando la solución inicial. Si la nueva solución tiene un costo $f(U_{new})$ menor al costo de la solución factible $f(U_{cur})$, la solución U_{new} es aceptada como la solución actual. Pero si tiene un costo superior, la nueva solución tiene una probabilidad no nula de ser aceptada de acuerdo a la probabilidad de Boltzmann: $P = \exp[-(f(U_{new}) - f(U_{cur}))/T_i]$. 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. De este modo, el algoritmo busca entre las distintas configuraciones de recorridos, aquellas que proveen menor costo.

Resultados y discusión

Para ejemplificar las ventajas del método propuesto frente a la metodología empírica de asignación de recorridos, se generaron 10 clusters que fueron definidos de acuerdo a la forma que tradicionalmente lo realizan las empresas lácteas, es decir, basándose en la experiencia previa o en la intuición. Para esto se tienen en cuenta la capacidad de los camiones, la ubicación de los tambos (ver Figura 1), y su producción. El resultado de la asignación por clusters utilizando la metodología tradicional de las empresas de la zona, determina un total de $f(r)=7,2$ kilómetros recorridos cada mil litros recolectados, lo que es igual que 139 litros de leche por kilómetro recorridos (ver Figura 2).

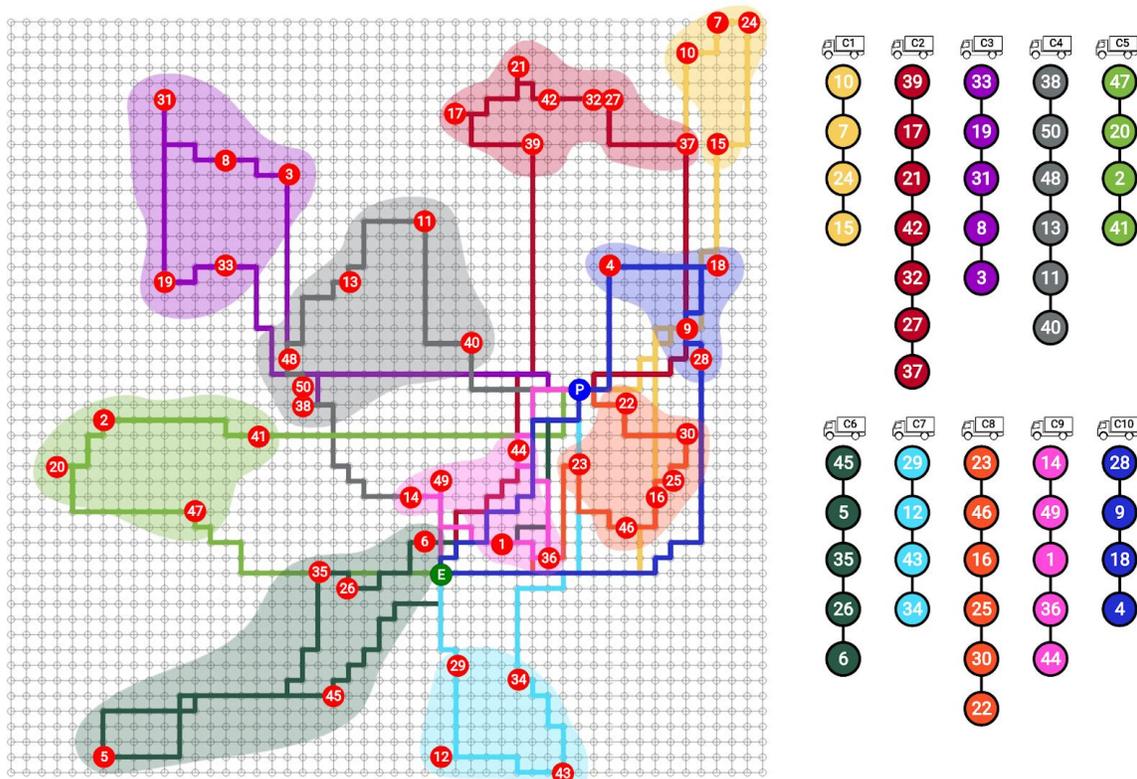


Figura 2 – Solución obtenida mediante Clusters

Por otra parte, el resultado de la aplicación de la metodología propuesta utilizando el algoritmo de recocido simulado se muestra en la Figura 3. Se obtiene $f(r)=5,9$ kilómetros por cada mil litros recolectados, o 168 litros de leche por kilómetro recorrido. Esta solución, o aquellas con un valor de costo similar se pueden encontrar en un tiempo de cómputo de entre dos y tres minutos en una PC de escritorio con un procesador i7. Es importante notar que el procedimiento de optimización permite operar con dos camiones menos para recolectar la misma cantidad de leche. La distancia total recorrida por los camiones mediante el método de

clusters fue de 906 km mientras que mediante el modelo de optimización metaheurístico provee una distancia total recorrida de 748 km.

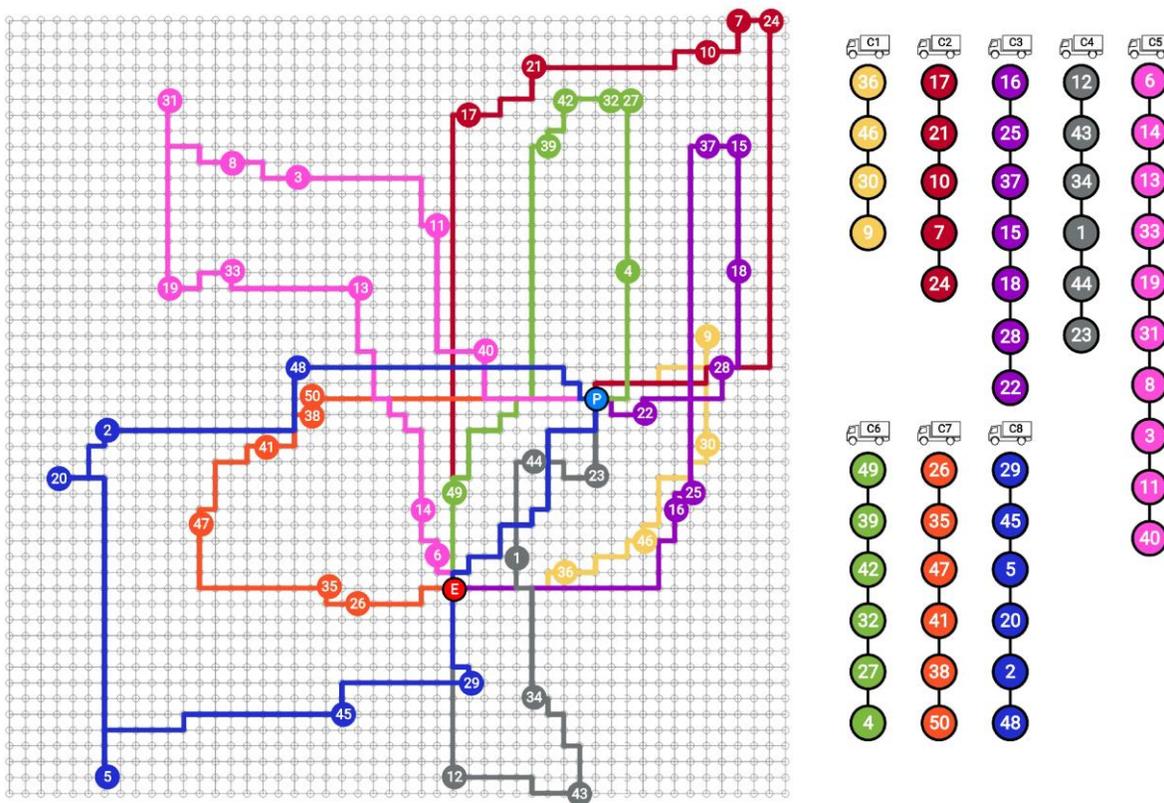


Figura 3 – Solución obtenida con Recocido Simulado

En trabajos posteriores se enriquecerá el análisis realizando un modelo más completo de huella de carbono considerando no solo las distancias recorridas, sino también una flota de vehículos con capacidades heterogéneas. Teniendo en cuenta, además, la carga transportada por los camiones 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).

Conclusiones

Con la aplicación de la metodología propuesta en el presente trabajo se ha obtenido una mejora del 17,4% en comparación con la asignación empírica de recorridos, según el indicador definido por la función objetivo. Esta mejora se debe a que dos camiones que en la asignación empírica estaban en uso, ya no se utilizan para la recolección optimizada, lo que ha llevado a una ocupación promedio de llenado de los tanques del 87,5% en los ocho camiones en servicio. Como resultado, la capacidad ociosa se ha reducido significativamente, pasando de un 30% a un 12,6%.

Es importante destacar que las mejoras identificadas tienen un impacto significativo en los costos operativos de las empresas. Por ejemplo, la eliminación de los gastos de sueldos correspondientes a dos camioneros, ya que se reduce el número de camiones en operación, así como la disminución de los gastos en combustible, mantenimiento, lubricantes y neumáticos. Asimismo, se logra una reducción en los tiempos de descarga al eliminar la necesidad de limpieza y montaje de las mangueras de descarga. Además de los beneficios financieros, la reducción de la huella de carbono está directamente relacionada con la disminución del consumo de combustible y la reducción de la distancia total recorrida, que se reduce en 158 kilómetros.

Por último, es importante mencionar que a nivel nacional se ha registrado un promedio de 92 kilómetros recorridos por cada mil litros recolectados, según datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2019). Esto indica que el diseño del modelo se encuentra en el mismo orden de magnitud y proporciona una base sólida para realizar comparaciones fiables.

Referencias bibliográficas

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. y Vecchi, M. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, 220(4598), 671-680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>

López-Castro, L. F., Solano-Charris, E. L. y Pagès-Bernaus, A. (2023). "Environmental approach for the design of raw milk collection routes with a heterogeneous fleet." *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, 107995. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107995>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2019). Estado de situación de la industria láctea argentina: Para la definición de políticas públicas 2016-2018. Recuperado 15 de junio de 2023. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_lecheria/industria/estado/estado.pdf

Paredes-Belmar, G., Montero, E. y Leonardini, O. (2022). "A milk transportation problem with milk collection centers and vehicle routing." *Isa Transactions*, 122, 294-311. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.04.020>

Paredes-Belmar, G., Marianov, V., Bronfman, A., Obreque, C. y Lüer-Villagra, A. (2016). "A milk collection problem with blending." *Transportation Research Part E-logistics and Transportation Review*, 94, 26-43. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.07.006>

Agradecimientos

Agradecemos a las empresas de la región y su personal que nos abrieron sus puertas y nos facilitaron información clave para el armado del modelo. Este trabajo se realizó bajo la dirección de los investigadores Gabriel Puccini y Carlos Bonetti en el marco del proyecto "Diseño de recorridos óptimos para el transporte de leche en condiciones de incertidumbre" (Código SCyT: ASECRA0008637).