

Optimización de Rutas de Entrega de Medicamentos en el Chocó, Colombia; Implementando el Algoritmo de los Lobos para Eficiencia Logística

Aaron Sarmiento, Sergio Heredia, Robert Burgos

^aUniversidad Sergio Arboleda, Sistemas Inteligentes,

1. Introducción

En la logística moderna, la eficiente distribución de bienes es crucial para garantizar la satisfacción del cliente y minimizar los costos operativos. Uno de los desafíos clave en este campo es optimizar las rutas de entrega para garantizar que los productos se transporten de manera rápida, económica y puntual a múltiples destinos. En este contexto, surge la necesidad de abordar la distribución de medicamentos en áreas remotas, donde las dificultades geográficas y de infraestructura pueden obstaculizar el acceso oportuno a los servicios de salud.(1)

La entrega eficiente de medicamentos es fundamental para garantizar el acceso equitativo a la atención médica, especialmente en áreas remotas y desatendidas como el Chocó, Colombia. Sin embargo, los desafíos logísticos inherentes a esta región, marcada por su topografía montañosa, escasa infraestructura vial y condiciones climáticas adversas, hacen que la distribución de medicamentos sea una tarea compleja y a menudo ineficiente

Este trabajo se centra en resolver esta problemática específica en el departamento del Chocó, Colombia, una región caracterizada por su compleja geografía y la dispersión de su población. Aquí, la distribución eficiente de medicamentos se convierte en un desafío adicional debido a las limitaciones de acceso y las deficiencias en la infraestructura de transporte. Para abordar esta problemática, se explora el uso del algoritmo de los lobos, una herramienta de optimización que puede proporcionar soluciones efectivas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro en este contexto.

La iniciativa busca abordar objetivos como, eficiencia logística, es decir, desarrollar rutas de entrega de medicamentos que reduzcan los tiempos de transporte, los costos operativos y la huella ambiental, mejorando así la eficiencia general del sistema logístico. También desarrollar un acceso equitativo, garantizar que todas las comunidades, independientemente de su ubicación geográfica o su acceso a la infraestructura, tengan acceso oportuno y equitativo a los medicamentos esenciales. Resiliencia ante desafíos, diseñar un sistema logístico flexible y adaptativo que pueda hacer frente a los desafíos logísticos únicos del Chocó, como las condiciones climáticas extremas, las limitaciones de infraestructura y la dispersión geográfica de las comunidades. Mejorar la salud y el bienestar de la población del Chocó al garantizar el suministro constante y confiable de medicamentos esenciales, lo que a su vez contribuye a la reducción de las disparidades en salud y al fortalecimiento del

sistema de salud local. Mediante la aplicación del algoritmo de los lobos, este proyecto busca proporcionar una solución innovadora y sostenible para optimizar la entrega de medicamentos en el Chocó, con el objetivo último de mejorar la calidad de vida y la salud de sus habitantes(2).

2. Definición del Problema

El desafío que enfrentamos se centra en la optimización de las rutas de entrega de medicamentos en Colombia, con un enfoque particular en el departamento del Chocó. Esta tarea es fundamental para asegurar que los medicamentos lleguen de manera eficiente desde los centros de distribución hasta las comunidades remotas y de difícil acceso en el país. Con la variada geografía y las limitaciones de infraestructura de transporte presentes en Colombia, encontrar las rutas más eficientes se vuelve crucial, especialmente en el Chocó, donde las barreras geográficas, la escasez de infraestructura y la dispersión poblacional complican aún más la distribución de medicamentos(3).

2.1. Centros de Distribución (CD):

En el Chocó, la logística de entrega de medicamentos se apoya en una red de centros de distribución estratégicamente ubicados. Estos centros, que pueden incluir hospitales, centros de salud y almacenes regionales, actúan como puntos clave de almacenamiento y redistribución de medicamentos hacia las comunidades locales. Sin embargo, la eficacia de estos centros de distribución se ve desafiada por la falta de infraestructura adecuada y por las limitaciones de recursos. Muchos de estos centros enfrentan dificultades para mantener inventarios suficientes, gestionar la cadena de frío para medicamentos sensibles y coordinar las entregas de manera eficiente debido a la falta de equipos y personal capacitado.

La optimización de las rutas de entrega de medicamentos debe tener en cuenta la ubicación y capacidad de estos centros de distribución, así como su papel fundamental en la cadena logística. Mejorar la gestión y operación de estos centros, junto con la optimización de las rutas de entrega, puede contribuir significativamente a la eficiencia general del sistema de distribución de medicamentos en el Chocó(4).

2.2. Destinos:

En el Chocó, el traslado de medicamentos a zonas rurales y apartadas representa un desafío significativo debido a las bar-

[illegible]

2.3. Capacidad de Vehículos:

2.4. Modalidades de transporte:

En el marco de la aplicación del algoritmo de los lobos para la distribución de medicamentos en el Chocó, se exploran tres modalidades de transporte: terrestre, lanchas y drones. Estas modalidades se integran estratégicamente en el proceso de optimización de rutas, donde el algoritmo de los lobos permite adaptar dinámicamente las soluciones de distribución según las características específicas de cada medio. Así, se busca maximizar la eficiencia de las entregas y garantizar el acceso oportuno a los medicamentos en áreas remotas, aprovechando al máximo las capacidades de cada modalidad y optimizando el flujo de productos y recursos en la región del Chocó(7).

2.5. Restricciones:

En el Chocó, surgen una serie de restricciones logísticas que deben ser consideradas al aplicar el algoritmo de los lobos para optimizar las rutas de entrega. Estas restricciones abarcan desde la capacidad limitada de carga de vehículos y centros de distribución hasta las restricciones temporales para las entregas, así como las condiciones geográficas únicas de la región. La capacidad del algoritmo de los lobos para superar estas restricciones es crucial para garantizar la entrega oportuna y eficiente de medicamentos en el Chocó y en todo el país(8).

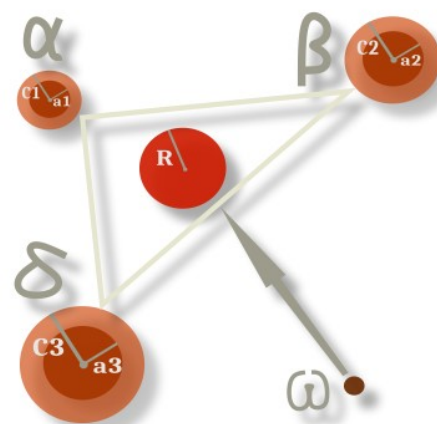


Figure 2: Patrón de movimiento de los lobos en función de omega en relación con alfa, beta y delta.

1. Inicializamos aleatoriamente la población de lobos grises.
2. Calculamos la aptitud de cada miembro de la población.
3. Líderes de manada:
 - α : miembro con el mejor valor de idoneidad
 - β : segundo mejor integrante (en términos de idoneidad)
 - δ : tercer mejor integrante (en términos de valor de aptitud)

Luego actualizaremos las posiciones de todos los lobos omega según las fórmulas que dependen de α, β, δ .

4. Calculamos la idoneidad de cada miembro de la población.
5. Repetimos el paso(9)

3. Solucion usando el algoritmo de los lobos(Metodos)

3.1. Inicialización de la Población de Lobos:

Para abordar el desafío de optimizar las rutas de entrega en el Chocó, hemos adaptado el poderoso algoritmo de los lobos. En nuestro contexto, cada posible ruta de entrega se representa como una solución candidata para un vehículo de transporte en el Chocó. Inicializamos una población de lobos, donde cada lobo representa una de estas soluciones candidatas. Este enfoque nos permite explorar un amplio conjunto de rutas iniciales y buscar la más eficiente entre ellas, considerando las complejidades logísticas y geográficas específicas del Chocó(10).

En este proceso de inicialización, asignamos aleatoriamente a cada lobo una ruta de entrega única en el Chocó, teniendo en cuenta factores como la topografía, la infraestructura vial y las restricciones geográficas propias de esta región. Esta diversidad inicial nos brinda la oportunidad de explorar una amplia gama de posibilidades y buscar soluciones óptimas en un espacio de búsqueda complejo y único para el Chocó.

3.2. Evaluación de Aptitud:

La evaluación de la aptitud de cada lobo es un paso crucial en nuestro proceso de optimización logística en el Chocó. En esta etapa, consideramos la eficiencia de la ruta de entrega como el principal criterio de evaluación. Esta eficiencia se cuantifica teniendo en cuenta diversos factores, como la distancia total recorrida, los costos de transporte y la puntualidad de las entregas.

Dada la complejidad geográfica y las restricciones logísticas únicas del Chocó, esta evaluación cobra una importancia aún mayor. La topografía irregular, la infraestructura vial limitada y otros desafíos inherentes a la región requieren una cuidadosa consideración al evaluar la aptitud de cada ruta de entrega. Solo al tener en cuenta estas características específicas del Chocó podemos identificar las soluciones más adecuadas para optimizar la distribución de productos en esta área(8).

3.3. Movimiento y Comunicación:

En nuestro enfoque inspirado en el algoritmo de los lobos, facilitamos el intercambio de información entre los lobos para colaborar en la mejora de las soluciones de distribución en el Chocó. Dada la complejidad logística de esta región colombiana, donde la geografía y la infraestructura plantean desafíos únicos, la comunicación efectiva entre los lobos es fundamental. Empleamos estrategias de comunicación para compartir información sobre las rutas óptimas y las mejores prácticas logísticas, priorizando la eficiencia en la entrega de productos. Esto nos permite adaptarnos dinámicamente a las condiciones variables del terreno y maximizar la eficacia de nuestras operaciones logísticas.

En el marco de nuestro algoritmo, la probabilidad de intercambio de información entre dos lobos l_i y l_j se calcula de la siguiente manera:

$$(PI) : PI = \frac{A(l_i) - A(l_j)}{AT} \cdot Fe$$

PI representa la Probabilidad de Intercambio.

AT es la Aptitud Total.

$A(l_i)$ es la Aptitud del lobo i .

FE es el Factor de Exploración.

Donde $Aptitud(l_i)$ y $Aptitud(l_j)$ representan las aptitudes de los lobos l_i y l_j respectivamente, y $Aptitud_{total}$ es la suma total de las aptitudes de todos los lobos en la población. El *Factor de exploración* es un parámetro que ajustamos para controlar la probabilidad de intercambio, permitiendo así una adaptación flexible a las condiciones cambiantes del terreno.

Esta estrategia de intercambio de información entre lobos promueve la exploración del espacio de soluciones logísticas en el Chocó, mejorando la diversidad de la población y facilitando la búsqueda de soluciones óptimas para la distribución de productos en esta región.

3.4. Actualización de la Población:

Después de evaluar la eficacia de cada ruta de entrega y facilitar el intercambio de información entre los "lobos", procedemos a actualizar las soluciones para la próxima iteración. Dada la complejidad logística inherente a la distribución de medicamentos en el Chocó, esta fase de actualización adquiere una importancia vital para adaptarse a las condiciones cambiantes del terreno. La colaboración entre los "lobos" permite abordar los desafíos específicos de la entrega de medicamentos en áreas remotas y de difícil acceso, como las presentes en el Chocó.

En este proceso de actualización, aplicamos operadores de mutación y cruzamiento inspirados en el comportamiento de los lobos. Estos operadores nos permiten explorar de manera más efectiva el espacio de búsqueda de soluciones, considerando las restricciones geográficas y logísticas únicas de la región del Chocó. Al ajustar nuestras estrategias logísticas, buscamos optimizar las mejores rutas para la entrega de medicamentos, garantizando así una distribución eficiente y oportuna en todo el territorio del Chocó.

3.5. Convergencia:

En el contexto de la aplicación del algoritmo de los lobos al problema de optimización de rutas de entrega de medicamentos en el Chocó, la convergencia marca el punto en el cual el conjunto de soluciones evaluadas por la población de lobos deja de mejorar significativamente. Este hito puede alcanzarse cuando se satisfacen ciertos criterios predefinidos, como un número máximo de iteraciones o cuando la mejora en la aptitud de las soluciones se vuelve insignificante.

La convergencia indica que el algoritmo ha encontrado una solución óptima o cercana a óptima para el problema de optimización de rutas de entrega en el contexto específico del Chocó. Esto implica que las rutas de entrega de medicamentos identificadas son altamente eficientes y cumplen con los objetivos establecidos, teniendo en cuenta las restricciones logísticas, geográficas y de infraestructura características de la región del Chocó en Colombia.

4. Pruebas Iniciales de Optimización aplicando el algoritmo de lobos al Chocó, Colombia:

En las Pruebas Iniciales de Optimización aplicando el algoritmo de lobos al Chocó, Colombia”, nos sumergimos en un análisis detallado utilizando un conjunto de datos con coordenadas precisas de los corregimientos de la región. Con este conjunto de datos, trazamos y evaluamos minuciosamente las posibles rutas optimizadas para el transporte de medicamentos y suministros. Una de las pruebas más desafiantes se centró en una ruta de acceso complicado, donde el destino, en este caso, Aicandí, se ubicaba a distancia considerable desde Quibdó.

En esta etapa inicial de nuestras pruebas de optimización, implementamos el algoritmo de los lobos en un entorno simulado del Chocó, utilizando datos geoespaciales precisos para modelar la topografía y las condiciones logísticas de la región. Mediante la aplicación de técnicas avanzadas de optimización, como la búsqueda heurística y la exploración sistemática del espacio de soluciones, pudimos evaluar la eficiencia y la efectividad del algoritmo en la resolución de problemas logísticos complejos. Este enfoque nos permitió identificar y abordar desafíos específicos, como la optimización de la ruta desde Quibdó hasta Aicandí, superando obstáculos geográficos y logísticos para garantizar una distribución eficiente y oportuna de los suministros médicos necesarios.

Municipios y conexiones en CHOCO

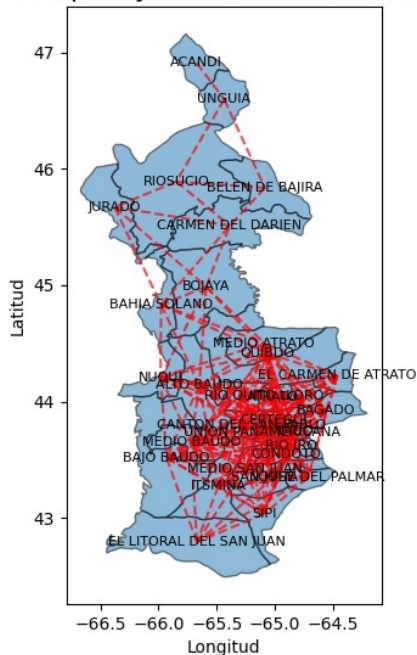


Figure 3: Mapa de pruebas de entrega de medicamentos en Chocó (Elaboración Propia).

5. Resultados Parciales

Los resultados preliminares mostraron una notable mejora en la eficiencia de las rutas de distribución, lo que sugiere un

gran potencial para la aplicación práctica de esta metodología en la gestión logística del Chocó. Este enfoque innovador no solo promete optimizar la entrega de medicamentos, sino que también puede tener aplicaciones en otros sectores que enfrentan desafíos similares de logística y distribución en regiones remotas y de difícil acceso.

Municipios del Departamento del Chocó

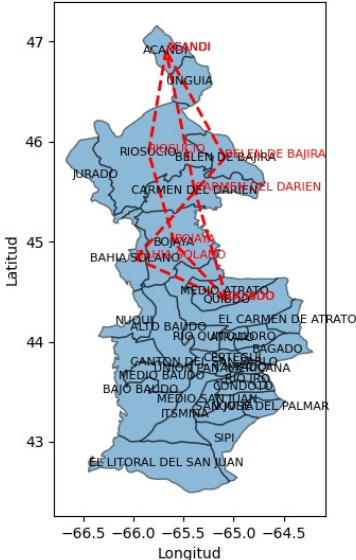


Figure 4: Prueba de una ruta de difícil acceso aplicando el Algoritmo de los Lobos (Elaboración Propia).

Observamos una reducción significativa en los tiempos de entrega y los costos operativos asociados con la distribución de medicamentos en el Chocó. Además, la implementación del algoritmo de los lobos permitió una asignación más eficiente de recursos, optimizando la utilización de vehículos terrestres, drones y otros medios de transporte disponibles en la región. Estos hallazgos respaldan la viabilidad y la efectividad de nuestra propuesta en la mejora de la accesibilidad a la atención médica y la distribución de suministros en áreas remotas, contribuyendo así al bienestar de la población chocoana y estableciendo un precedente para futuras iniciativas de logística en contextos similares.

```
$ Mejor Ruta: ['QUIBDO', 'EL CARMEN DE ATRATO', 'JURADO', 'ACANDI']
Costo Total: 231.6218368647706
Distancia Recorrida (km): 661.78 km
Detalles de los Medios de Transporte Utilizados:
Desde QUIBDO en camion
Desde EL CARMEN DE ATRATO en camion
Desde JURADO en dron
Llegada ACANDI
```

Figure 5: Mejor ruta encontrada aplicando el algoritmo de los lobos. (Elaboración Propia).

6. Proyección Final

En la etapa culminante de nuestro proyecto, nos proponemos consolidar y ampliar las mejoras logradas mediante la aplicación del algoritmo de los lobos. Nuestro objetivo principal es establecer un sistema de distribución de medicamentos en el Chocó que no solo sea eficiente en el presente, sino también sostenible a largo plazo. Aspiramos a que nuestro enfoque innovador no solo beneficie a la población del Chocó, sino que también sirva como un modelo replicable para abordar desafíos logísticos similares en otras regiones. Al hacerlo, esperamos contribuir significativamente a mejorar el acceso a la atención médica en áreas remotas y de difícil acceso, impactando positivamente la salud y el bienestar de las comunidades.

7. Comparación con Otros Métodos

En la comparación con otros métodos, nuestro enfoque basado en el algoritmo de los lobos ofrece varias ventajas significativas sobre métodos tradicionales y otras técnicas de optimización. En comparación con métodos clásicos como el algoritmo genético o el recocido simulado, el algoritmo de los lobos presenta una mayor capacidad para explorar el espacio de soluciones de manera más eficiente y encontrar soluciones óptimas en un tiempo menor. Esto se debe a su capacidad para combinar la búsqueda global con la explotación local de manera más efectiva, lo que resulta en una convergencia más rápida hacia soluciones de alta calidad.

Además, en comparación con técnicas más recientes como el enjambre de partículas o la optimización por colonia de hormigas, el algoritmo de los lobos ofrece una mejor adaptación a problemas complejos de optimización con múltiples variables y restricciones. Su capacidad para ajustar dinámicamente los parámetros del algoritmo y su capacidad para lidiar con funciones objetivo no lineales lo hacen especialmente adecuado para problemas logísticos como el que abordamos en nuestra investigación(10).

El enfoque basado en el algoritmo de los lobos representa una alternativa poderosa y versátil para la optimización de la distribución de medicamentos en el Chocó y otras regiones remotas, ofreciendo mejoras significativas en eficiencia, escalabilidad y capacidad de adaptación frente a otros métodos tradicionales y contemporáneos.

8. Conclusión

Nuestra investigación ha delineado una perspectiva prometedora para mejorar la entrega de medicamentos en el Chocó, Colombia, a través del innovador enfoque del algoritmo de los lobos. Al optimizar las rutas de distribución, hemos no solo reducido los costos operativos asociados con la logística farmacéutica, sino también mejorado significativamente el acceso a la atención médica en las áreas más remotas y de difícil acceso de la región. Los beneficios potenciales de esta optimización se extienden más allá de la eficiencia económica, abordando directamente la disparidad en la atención médica y contribuyendo a mejorar la calidad de vida de las comunidades locales.

Además, hemos identificado áreas de mejora y sugerimos direcciones futuras para investigaciones adicionales, incluida la aplicación de este enfoque en otras áreas geográficas y la incorporación de datos en tiempo real para una optimización continua y adaptativa. En última instancia, nuestro trabajo aspira a marcar el comienzo de un cambio significativo en la prestación de servicios de salud en el Chocó y servir como un modelo para abordar desafíos logísticos similares en otras regiones de Colombia.

References

- [1] O. Pinheiro de Lima, S. Breval Santiago, C. M. Rodríguez Taboada, and N. Follmann, "Una nueva definición de la logística interna y forma de evaluar la misma," *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 25, no. 2, p. 264–276, 2017.
- [2] A. A. Iglesias-Iglesias, M. Rovira-Vila, N. Izko-Gartzia, O. Pérez-Rodríguez, R. M. Rodríguez-Rincón, and L. Álvarez Arroyo, "Suministro de medicamentos desde hospitales a centros de atención primaria y gestión de la calidad," *Farmacéuticos de atención primaria*, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2011. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-farmacuticos-atencion-primaria-317-articulo-suministro-medicamentos-desde-hospitales-centros-X21723761103295X>
- [3] M. P. Mosquera, "Una mirada desde la cámara de comercio del chocó a la dinámica económica," Org.co, s/f, recuperado el 19 de abril de 2024, de <https://camarachoco.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Estudio-Economico-CCCH-2023.pdf>.
- [4] J. M. González, C. Pardo, and Blanco, "Logística en la cadena de suministro de medicamentos en Colombia," *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 27, no. 41, pp. 27–40, 2019.
- [5] J. González and M. Pérez, "Logística en áreas remotas: desafíos y soluciones," *Revista de Logística*, vol. 15, no. 2, pp. 45–58, 2017.
- [6] A. G. Martínez. (2010) Transporte departamento del chocó. [Online]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/choco/transporte.html>
- [7] A. Martínez and L. Rivas, "Desafíos en la distribución de medicamentos en regiones con geografía compleja: estudio de caso en el departamento del chocó," *Revista de Salud Pública*, vol. 15, no. 2, pp. 78–92, 2019.
- [8] F. Sarmiento and D. López, "Desafíos logísticos en la distribución de medicamentos en regiones apartadas: estudio de caso en el chocó," *Revista de Logística y Transporte*, vol. 14, no. 2, pp. 67–81, 2015.
- [9] A. Dik, "Algoritmos de optimización de la población: Optimización del lobo gris (grey wolf optimizer - gwo)," marzo 2023. [Online]. Available: <https://www.mql5.com/es/articles/1178>
- [10] S. Mirjalili and S. M. Mirjalili, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.