

<https://doi.org/10.47460/minerva.v5i14.148>

# Modelo matemático en la optimización del costo del transporte pesado de carga agrícola

Juan Alberto Avalos Reyes  
<https://orcid.org/0000-0001-6813-3879>  
javalos@esPOCH.edu.ec  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba-Ecuador

Patricia Mercedes Cepeda Silva  
<https://orcid.org/0000-0001-5432-8165>  
patricia.cepeda@esPOCH.edu.ec  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba-Ecuador

Paúl Cáceres  
<https://orcid.org/0000-0002-5112-1414>  
alejandro.caceres@esPOCH.edu.ec  
paul.caceres@iste.edu.ec  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba-Ecuador

Recibido (15/11/2023), Aceptado (13/01/2024)

**Resumen:** El objetivo de este trabajo fue diseñar un modelo matemático para optimizar el costo del transporte pesado de carga agrícola, utilizando programación lineal. El modelo se basó en el estudio de costos fijos y variables en los cuales se ponderó la distancia, el volumen de carga, el tiempo de llegada y salida, lubricantes y combustibles y demás variables que intervienen en la fijación del precio del transporte. El trabajo tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y su diseño de carácter no experimental con corte transversal, se emplearon los métodos, inductivo, deductivo y el sistémico. Para la recolección de la información se utilizó como técnica la encuesta y como instrumento el cuestionario, evidenciándose que en su mayoría los transportistas desconocen el cálculo del costo real del transporte, visualizándose así la necesidad de un modelo matemático en la optimización de los costos, logro validado en el programa WINQSB (Módulo Network Modeling).

**Palabras clave:** modelo matemático, programación lineal, costos, transporte pesado.

Mathematical model in the optimization of the cost of heavy agricultural cargo transportation

**Abstract.-** This work aimed to design a mathematical model to optimize the cost of heavy agricultural load transport using linear programming. The model was based on studying fixed and variable costs, including distance, cargo volume, arrival and departure times, lubricants, fuels, and other variables that influence transport pricing. The work had a quantitative approach, descriptive type, and its design of the non-experimental character with a cross-section. The methods were used, inductive, deductive, and systemic. For the collection of information, the survey was used as a technique and the questionnaire as an instrument, evidencing that most carriers do not know the calculation of the actual cost of transport, thus visualizing the need for a mathematical model in cost optimization, an achievement validated in the WINQSB program (Network Modeling Module).

**Keywords:** mathematical model, linear programming, costs, heavy transport.

## I. INTRODUCCIÓN

Una amplia literatura relaciona el tema de la transportación con los modelos matemáticos, entre los principales se puede destacar, el transporte, costos del transporte, programación lineal, entre otros. La vinculación de los términos antes descritos apoyan a lo que plantea Guerrero [1] sobre las herramientas de programación lineal en el cálculo de aproximaciones sucesivas de costos hasta llegar al costo mínimo, constituyéndose en una guía efectiva para el desarrollo de la investigación en torno al cálculo del costo del transporte que en la actualidad es una debilidad en el sector de la transportación de carga pesada, por lo que la investigación busca diseñar el modelo matemático que optimice el costo del transporte para el traslado de bienes agrícolas desde el centro sierra del Ecuador (origen) hacia las ciudades costeras y de frontera del mismo (destinos), considerando elementos constitutivos como: el combustible, lubricantes, rodamientos, mantenimiento, depreciación de vehículos, entre otros, agrupados en costos fijos y variables [2].

Otras investigaciones revelan que es fundamental el cálculo de los costos de producción de los bienes o generación de servicios, en este contexto se trabaja en la investigación sobre los costos que genera la transportación de carga pesada vía terrestre, por cuanto para el modelado se emplea la programación lineal y métodos particulares como: esquina noreste, costos mínimos, Vogel y Russel que analizan variables de vital importancia para integrar un costo que a las organizaciones transportadoras les permita tomar decisiones en busca de la competitividad anhelada en un mercado cada vez más exigente [3].

El trabajo inicia con el fundamento teórico que constituye el soporte del modelo matemático, aquí se presentan conceptos fundamentales de costos, transporte, movilidad de carga, elementos integrados que forman el modelo requerido. Seguidamente se plantea el desarrollo del modelo que parte de la definición del problema, el establecimiento del modelo matemático, la resolución del modelo, los resultados y decisión de implementación. A continuación, se establece la metodología que orienta un conjunto de operaciones y/o estrategias para alcanzar el modelo como verdad con un resultado concreto. Finalmente se presenta la discusión de los resultados del cálculo del costo total de transporte en el programa WINQSB módulo Network Modeling.

## II. DESARROLLO

Los costos de transporte son considerados como un costo fundamental en la definición de los precios al consumidor, puesto que, estos se suman directamente al costo de producción o generación de servicio para determinar el precio de venta al público. El transporte por carretera es la actividad con mayor participación en el sector del transporte ecuatoriano, el mismo que cuenta con un rezago en el tema de infraestructura vial por su baja calidad en carreteras, lo que ocasiona retraso en las entregas de mercancías y elevación en los costos de traslados [4].

En países como Colombia y Bolivia se ha observado que el transporte terrestre constituye la base fundamental de movilidad de mercancías a nivel interno país y fuera de sus fronteras, aquello se puede observar fácilmente a través del intercambio comercial de bienes agrícolas, agroindustriales, químicos, tecnológicos, artículos del hogar, entre otros, donde juegan un papel importante los vehículos de carga al servicio del comercio local e internacional, medio de transporte que no solo facilita el traslado de mercancías sino disminuye el tiempo de llegada de las mismas a los mercados a un costo más asequible que otros medios de transporte, siendo válidas las transacciones comerciales entre propietarios de carga y propietarios de medios de transporte, quienes demandan transacciones que contribuyen no solo al bienestar de los contrayentes, sino al PIB de cada país [5].

El modelo matemático propone el cálculo de los costos del transporte de productos agrícolas desde tres puntos de origen hacia tres puntos de destino. En él se integra un conjunto de variables dependientes e independientes que generan vínculos fuertes entre el costo individual de ellos con el cálculo del costo del transporte y la aceptación de los clientes. El modelo se concibe como una representación matemática de fenómenos o procesos con el objetivo de analizar, describir y simular el costo de la trasportación de carga pesada en el sector agrícola [6]. Una clase especial de programación lineal dentro de los modelos descriptivos o de optimización es el modelo de transporte que busca minimizar el costo total del traslado de bienes desde sus orígenes (embarque), hacia distintos destinos (desembarque) [7].

El modelo de transporte en su desarrollo requiere de los valores unitarios de envío de los productos agrícolas desde sus puntos de origen a cada uno de los centros de consumo considerándose la oferta y la demanda como un elemento fundamental en el mercado del transporte, mediante la función objetivo se plantea la optimización de los costos asociados a la movilidad de mercancías; es decir, la función de minimización del costo de distribución [8]. Los métodos empleados en la investigación para la optimización del costo son: Esquina Noreste, Costos Mínimos, Vogel y Russel, con el uso de programas computacionales que facilitan la resolución de este tipo de problemas. WINQSB, programa informático que dentro de sus módulos cuenta con Network Modeling, módulo que permite obtener inmediatamente los resultados óptimos [9].

En los problemas de transporte [7], aplica el método Esquina Noreste, Costos Mínimos, entre otros que involucran variables de decisión, como la cantidad de bienes a ser transportados desde los orígenes  $i$  hacia los destinos  $j$ , expresándose como  $x_{ij}$ ; y, el costo de traslado desde los orígenes hacia los destinos  $c_{ij}$ , estructurándose la función que representa el cálculo del costo del transporte en:

$$Z_{min} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeta a:

La oferta total en el origen

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} = a_i (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

La demanda total en el destino

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

El cálculo del costo del transporte comprende básicamente la igualdad entre la oferta y la demanda expresado matemáticamente por:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (4)$$

Condiciones de no negatividad, condición fundamental para este tipo de problemas.

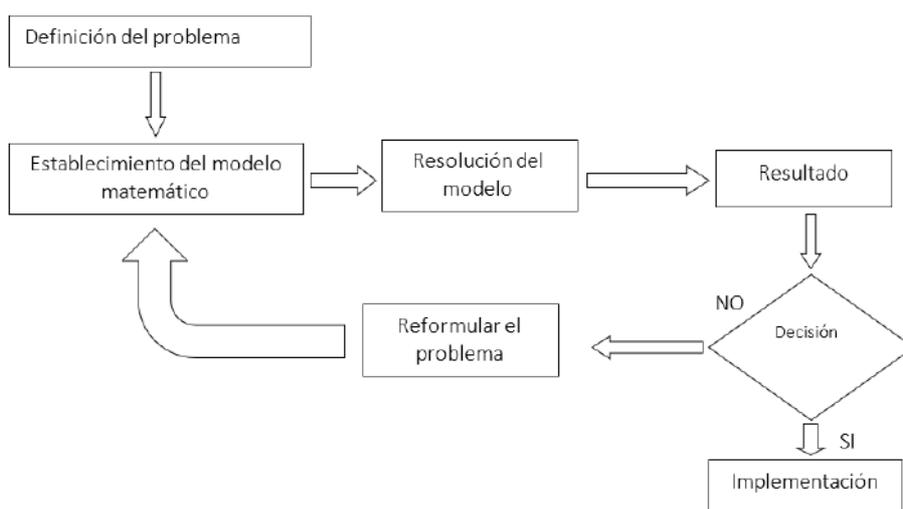
$$\forall x_{ij} \geq 0 \quad (5)$$

A partir de este momento se da paso a la condición de optimalidad con el cálculo de la función matemática [10].

### III. METODOLOGÍA

El trabajo investigativo parte de la clasificación de los costos de transporte en fijos y variables, mantiene un enfoque cuantitativo por tal razón hace uso de modelos de optimización y simulación por computadora, es de tipo descriptivo puesto que la investigación está dirigida a un grupo específico, en este caso un grupo de transportistas de carga pesada que prestan sus servicios en el centro sierra del país, en cuanto al diseño, es de carácter no experimental, dado que los sujetos de estudio (transportistas) son evaluados en su contexto natural sin alterar ninguna situación y de corte transversal porque los datos se recogieron en un solo momento aplicándose el muestreo probabilístico simple, bajo un cuestionario de encuesta.

Las fases o etapas a seguir en la resolución del problema de transporte son de coincidencia entre autores como [7]. Estas etapas se expresan en la figura 1:



**Figura 1.** Metodología de resolución de problemas de investigación operativa  
Fuente: propia.

Siguiendo la metodología antes referida, se desarrolló el modelo matemático para el cálculo del costo del transporte de carga pesada, llevándolo al programa WINQSB conocido como Sistema Cuantitativo para Negocios, mismo que contiene herramientas versátiles para resolver distintos tipos de problemas en el campo de la investigación operativa. El programa comprende diecinueve módulos, uno de ellos destaca en sus aplicabilidades, Network Modeling o Modelación de redes. Una red contiene nodos y conexiones y el nodo tiene la capacidad para el flujo de red y los problemas de transporte, al existir una conexión entre dos nodos, puede haber un costo, un beneficio, una distancia o la capacidad de flujo asociado a la conexión. NET soluciona la conexión o el envío satisfaciendo las restricciones optimizando la función objetivo especificada. El módulo incluye aplicaciones que resuelven problemas de transporte, transbordo, asignaciones, ruta más corta, flujo máximo entre otros, que son utilizados por excelencia en ingeniería industrial y administración empresarial por su versatilidad y fácil uso.

Las empresas del centro sierran del Ecuador (Riobamba) que se dedican a la prestación de servicios de transporte en el traslado de mercancías a nivel nacional, tienen sus clientes en las ciudades de, Guayaquil, Machala y Huaquillas, quienes requieren del servicio de traslado de productos agrícolas tres veces por semana con capacidad completa de carga en vehículos de 18 toneladas, situación que se consideró en el modelo matemático.

## IV. RESULTADOS

El estudio se centra en tres principales centros de distribución de productos agrícolas, desde los cuales se envían los productos a tres centros de consumo en distintas localidades, constituyéndose los costos de transporte en un rubro sensible en las operaciones de comercio que realizan los distribuidores de productos agrícolas, de ahí la necesidad de establecer el plan de envíos que minimice el costo del transporte asociado a esta actividad.

### A. Establecimiento del modelo matemático

El modelo matemático toma en cuenta aspectos como capacidad de carga de los vehículos, distancia recorrida, combustibles, lubricantes, depreciaciones, entre otros elementos básicos en el establecimiento de los costos fijos y variables para las rutas objeto de estudio, Riobamba– Guayaquil, Riobamba–Machala, Riobamba–Huaquillas, Cajabamba–Guayaquil, Cajabamba–Machala, Cajabamba–Huaquillas, Guamote–Guayaquil, Guamote–Machala, Guamote–Huaquillas, rutas en las que se obtuvo el costo de transportar los productos agrícolas en seis vehículos con capacidad de carga de 18 toneladas en lo correspondiente a un viaje, ida y vuelta.

### B. Resolución del modelo

Siguiendo la estructura básica del problema de programación lineal, la solución involucró la oferta y la demanda, así como los costos respectivos de traslado de mercancías en vehículos con capacidad de carga de 18 toneladas; es decir, la matriz de costos  $C_{ij}$  y la matriz de cantidades  $X_{ij}$  que se visualiza en las tablas 1 y 2 [12].

La tabla 1, muestra los costos por viaje en vehículos de 18 toneladas desde los orígenes uno, dos y tres hacia los destinos uno, dos y tres.

**Tabla 1.** Matriz de costos por viaje vehículo 18 toneladas ( $C_{ij}$ ).

Origen	Destino		
	Guayaquil	Machala	Huaquillas
Riobamba	\$ 379,43	\$ 416,69	\$ 451,25
Cajabamba	\$ 370,69	\$ 407,97	\$ 442,53
Guamote	\$ 395,16	\$ 432,42	\$ 466,98

Fuente: Propia.

La tabla 2, visualiza las cantidades de productos agrícolas que se ofertaron y demandaron con traslado en vehículos de 18 toneladas.

**Tabla 2.** Matriz de cantidades vehículo 18 toneladas ( $X_{ij}$ ).

	$X_{ij}$			Orígenes	OFERTA
	Matriz de cantidades				
	Destinos				
	Guayaquil	Machala	Huaquillas		
	35,64			Riobamba	35,64
	23,76	28,08	15,12	Cajabamba	66,96
			5,4	Guamote	5,4
<b>DEMANDA</b>	59,4	28,08	20,52		108 ton

Fuente: Propia.

A efectos de simulación se ingresan los datos básicos en el programa WINQSB y se utiliza el módulo Network Modeling para generar resultados sobre el cálculo del costo del transporte requerido en un vehículo de 18 toneladas por cada método citado en apartados anteriores.

*Método esquina noreste*

La figura 2 muestra los resultados del costo de transporte por el método Esquina Noreste, mismo que asciende a 2.388,9 dólares americanos.

From \ To	Guayaquil	Machala	Huaquillas	Supply	Dual P(i)
Riobamba	21.08	23.15	25.07	35.64	0
Cajabamba	20.59	22.67	24.59	66.96	-0.49
Guamote	21.95	24.02	25.94	5.4	0.86
Unfilled_Dema	+1M	+1M	+1M	-59.4	-25.08+1M
Demand	28.08	20.52	0		
Dual P(j)	21.08	23.16	25.08		
<b>Objective Value = 0.00M+2,388.9</b>					

Figura 2. Cálculo método Esquina Noreste en WINQSB.

*Método de costos mínimos*

La figura 3 muestra los resultados del costo de transporte por el método Costos Mínimos, mismo que es de 2.388,63 dólares americanos.

From \ To	Quayaquil	Machala	Huaguillas	Supply	Dual P(i)
Riobamba	21.08	23.15	25.07	35.64	0
		20.52	15.12		
Tujabamba	20.59	22.67	24.59	66.96	-0.48
	59.4	7.56			
Guamote	21.95	24.02	25.94	5.4	0.87
			5.4		
Unlled_Demand	+1M	+1M	+1M	-59.4	-25.07+1M
			0		
Demand	28.08	20.52	0		
Dual P(j)	21.07	23.15	25.07		

**Objective Value = 0.00M+2,388.6**

Figura 3. Cálculo método Costos Mínimos en WINQSB.

*Método de Vogel*

La figura 4 muestra los resultados del costo de transporte por el método Costos Mínimos, mismo que es de 2.388,60 dólares americanos.

From \ To	Quayaquil	Machala	Huaguillas	Supply	Dual P(i)
Riobamba	21.08	23.15	25.07	35.64	0
		28.08	7.56		
Tujabamba	20.59	22.67	24.59	66.96	-0.48
	59.4		7.56		
Guamote	21.95	24.02	25.94	5.4	0.87
			5.4		
Unlled_Demand	+1M	+1M	+1M	-59.4	-25.07+1M
			0		
Demand	28.08	20.52	0		
Dual P(j)	21.07	23.15	25.07		

**Objective Value = 0.00M+2,388.6**

Figura 4. Cálculo método Vogel en WINQSB.

*Método de Russel*

La figura 5 muestra los resultados del costo de transporte por el método Costos Mínimos, mismo que es de 2.388, 60 dólares americanos.

From \ To	Guayaquil	Machala	Huaquillas	Supply	Dual P(i)
Riobamba	21.08	23.15	25.07	35.64	0
		28.08	7.56		
Tajabamba	20.59	22.67	24.59	66.96	-0.48
	59.4		7.56		
Guamate	21.95	24.02	25.94	5.4	0.87
			5.4		
illed_Dema	+1M	+1M	+1M	-59.4	-25.07+1M
			0		
Demand	28.08	20.52	0		
Dual P(j)	21.07	23.15	25.07		

**Objective Value = 0.00M+2.388.6**

**Figura 5.** Cálculo método Vogel en WINQSB.

Aplicado los métodos en el módulo Network Modeling del programa WINQSB se estima que los resultados son óptimos para el traslado de las mercancías, notándose que Esquina Noroeste proporciona un costo de \$ 2.388, 9, Costos Mínimos el valor de \$ 2.388, 6, con Vogel el costo es de \$ 2.388, 6 y con Russel \$ 2.388, 6; los tres últimos métodos tienen valores coincidentes no así el método de Esquina Noreste que tiene un diferencial de costo en \$ 0,30 ctvs.; sin embargo se puede decir que el modelo matemático proporciona un costo menor al promedio del mercado que es de 2.500 por la movilización de 6 vehículos con frecuencia de tres traslados por semana, por lo que se recomendó la adopción del modelo en este tipo de traslados.

**CONCLUSIONES**

El modelo matemático para el cálculo del costo del transporte se consolida utilizando un conjunto de ecuaciones e inecuaciones lineales que permiten la optimización bajo un objetivo de minimización de costos de traslado de productos agrícolas entre tres puntos de origen y tres puntos de destino. El cálculo se viabiliza a través de aplicaciones de software WINQSB y su módulo Network Modeling, mismo que verifica la existencia de un costo mínimo con las condiciones descritas, alcanzando el objetivo planteado inicialmente, es decir, minimizar el costo de envío de las mercancías desde los orígenes a sus destinos, reduciéndose de USD. 2.500,00 a USD. 2.388,60.

Por otra parte, es importante mencionar que el modelo está sujeto a cambios en sus variables fundamentales (costos variables) lo que hace que el mismo sea una representación aproximada de la realidad y que se constituye en una herramienta de toma de decisiones en el que la última palabra la tienen los empresarios del transporte y los usuarios del servicio de transporte; siendo recomendable complementar el presente estudio con nuevas investigaciones sobre negociaciones y cálculo de rentabilidad en negocios, de tal manera que los empresarios cuenten con soluciones inteligentes a sus problemas económicos cotidianos.

## REFERENCIAS

- [1] H. Guerrero, Programación Lineal Aplicada, Tercera ed., Bogotá: Ecoe Ediciones Ltda., 2022.
- [2] L. Berrones, «Costos operativos en el transporte de mercancía por carretera: el caso de los sistemas de Construcción ligera en México,» DYO, vol. 73, pp. 5-17, 2021.
- [3] E. Bermeo y J. Calderón, «Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte,» REDALYC, n° 32, pp. 52-67, 2009.
- [4] J. Baena, D. Castaño y M. Tabares, «Comparativo de las condiciones de transporte terrestre de carga entre los países miembro de la Alianza del Pacífico,» En-Contexto Revista de Investigación en Administración, Contabilidad, Economía y Sociedad, vol. IV, n° 5, pp. 154-172, 2016.
- [5] C. López y S. Pardo, «El transporte de carga terrestre en el comercio internacional. Análisis comparativo entre Bogotá, Colombia y Santa Cruz de la Sierra, Bolivia,» SCIELO, vol. 29, n° 54, pp. 89-114, 2019.
- [6] M. Pérez, «<https://conceptodefinicion.de/>,» 26 10 2021.  
[En línea]. Available: <https://conceptodefinicion.de/modelo/>. [Último acceso: 15 02 2023].
- [7] H. Taha, Investigación de Operaciones, 10ma Edición ed., Mexico: Pearson Educacion, 2017.
- [8] P. Alzate, Investigación de Operaciones, conceptos fundamentales, Bogotá: Ediciones de la U, 2018.
- [9] J. Bello, G. Casanova, L. Flores, E. Pacini y S. Santos, Win QSB sistema de consulta para negocios, México: Alpha, 2018.
- [10] P. Raimundo, Investigación de Operaciones I: Programación lineal, México : Alpha, 2017.
- [11] A. Acosta, E. Rivas y O. Salcedo, Investigación de Operaciones, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2019.
- [12] P. Cepeda, «<https://biblioteca.esPOCH.edu.ec/>,» 05 2022.  
[En línea]. Available: <https://biblioteca.esPOCH.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=71756>. [Último acceso: 17 02 2023].
- [13] A. Benavides, «Muestreo Estratificado,» Universidad de Bio Bio, Chile, 2022.
- [14] J. Calizaya, Y. Alemán, R. Bellido y F. Ceballos, La investigación cuantitativa en las ciencias sociales, Segunda ed., Quito: AutanaBooks, 2022.
- [15] Banco Mundial, «Banco Mundial,» 17 agosto 2022.  
[En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/home>.

**LOS AUTORES**

**Alberto Avalos**, es ingeniero en Administración de Empresas y Master en Finanzas; docente de la Facultad de Administración de Empresas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con amplias habilidades y experiencia Administrativa.



**Patricia Cepeda**, es ingeniera en Finanzas; Magister en Matemáticas Mención Modelación y Docencia. Ha desarrollado capacidades en campo de la proposición de actividades de investigación.



**Paul Cáceres**, Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones con Maestría en Matemática Aplicada, cuenta con habilidades para el manejo de plataformas virtuales y demuestra una sólida capacidad para aprender y colaborar de manera eficiente dentro de equipos, siempre manteniendo altos estándares éticos.