

Desarrollo de modelos basados en simulación y optimización heurística como soporte para la toma de decisiones en operaciones de transporte de carga fluvial

John Henry Ríos Griego*
María Carolina Sarabia Viaña*
María Carolina Herrera Hernández*
Carlos Daniel Paternina Arboleda*^a

Resumen

Este artículo presenta el diseño e implementación de modelos basados en simulación y optimización heurística para apoyar el proceso de toma de decisiones en operaciones de transporte de carga fluvial. Su desarrollo implica formular y solucionar modelos de optimización mediante la simulación de operaciones de flujo de carga a lo largo del río Magdalena (Colombia). Las decisiones también son tomadas con relación a la gestión de centros de distribución ubicados a lo largo del río y a la demanda de servicios que una empresa transportadora pueda atender en los puntos de destino. Un análisis de sensibilidad se realiza sobre los parámetros de capacidad, planeación de transporte, expansión y localización, todo esto a escala táctica y operativa.

Palabras clave: Modelo, simulación, optimización, heurística, toma de decisiones, transporte.

Abstract

This article presents the design and implementation of models based on heuristic simulation and optimization to support the decision-making process in operations of riverine load transport. Its development implies formulating and solving optimization models through the simulation of operations of load flow throughout the Magdalena river (Colombia). The decisions are also taken in relation with the management of distribution centers located along the river and with the demand of services that a transport company can attend in the destination points. An analysis of sensibility is carried out on the parameters of capacity, transport planning, expansion and location, all of this in a tactical and operative scale.

Key Words: Model, Simulation, Optimization, Heuristic, Decision-making, Transport.

Fecha de recepción: 4 de agosto de 2006
Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2008

*Los autores pertenecen al Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte de Barranquilla.

^aAutor correspondiente: cpaterni@uinorte.edu.co

Introducción

El transporte es una de las actividades de mayor importancia para el desarrollo económico, social y tecnológico de una región (Bondorfer, Grotschel y Lobel). Si personas y carga se movilizaran libremente en un territorio determinado y en condiciones ideales, su desarrollo y la calidad de vida de sus habitantes mejorarían considerablemente.

En América del Sur, aún hoy día el transporte fluvial, tanto interno como externo, no ha tomado la importancia que amerita, solo Brasil, Argentina y Venezuela han logrado desarrollar hidrovías navegables que contribuyen a su crecimiento. En la actualidad, muchas de las empresas dedicadas al transporte fluvial de carga en Colombia utilizan métodos manuales para programar sus operaciones, en lugar de usar la simulación y optimización (Ríos, Ríos y Martín) que además de contribuir al progreso continuo de sus operaciones fluviales, también sirven como apoyo para futuras decisiones operativas, financieras y económicas.

En el ámbito del transporte los problemas de planeación se refieren a pronósticos de la demanda en este proceso, y también están relacionados con aspectos estratégicos como decisiones en el tamaño de la flota, inconvenientes operativos como la programación y ruteo y algunos otros que definitivamente están por fuera del control de la compañía, tal es el caso de la seguridad en ciertos trayectos y las condiciones ambientales del río.

Debido a estos problemas muy generalizados, resulta de gran importancia para las empresas de transporte fluvial la implementación de *software* que ofrezca apoyo confiable y eficiente para la toma de decisiones. Por esta razón, este artículo detalla en un modelo genérico que representa las operaciones de carga fluvial, las variables incluídas que pueden ser modificadas y adaptadas al caso de cualquier empresa con condiciones similares.

Tiempo, nivel del río y tamaño de la flota

Existen numerosas variables que influyen en la construcción de un modelo para representar las

operaciones de las embarcaciones, sin embargo, se cuentan tres aspectos esenciales:

El tiempo. Esta variable resultó importante en el modelo genérico desarrollado en este caso de estudio, por lo que fue necesario validarlo y asegurar que representa la realidad, lo cual implica determinar los tiempos que cada embarcación tarda mientras es cargada, viaja y es descargada finalmente. Entre ellos se cuentan tiempos comunes como viaje, pernoctación, fraccionamiento, tiempo muerto por mal clima o inseguridad en el trayecto. Además se cuentan los correspondientes a carga y descarga. En cada caso los datos fueron estadísticamente tratados para determinar la distribución de probabilidad a la que cada uno se ajusta, de modo que la información pueda ser incluida en el modelo.

El nivel del río fue otro aspecto que requirió análisis específico. Corresponde a la distancia entre el fondo (base) del río y su superficie y es un concepto esencial para las compañías dedicadas al transporte fluvial, dado que es determinante en el tamaño de la carga que puede ser transportada en estaciones particulares del año. Este dato fue tratado con el método de series de tiempo, por ser el que mejor se ajustó a la información histórica entregada por la empresa en la que se validó el modelo. Como consecuencia del estudio, se determinaron pronósticos con los cuales es posible cubrir el modelo para periodos futuros.

Finalmente está el tamaño de la flota, también conocido como embarcaciones operativas para el transporte. En este caso es necesario registrar y verificar la capacidad de remolcadores y botes disponibles y luego analizar y contrastar esta información con el tipo de producto que va a ser transportado, considerando la dirección de los remolcadores, para asignar la carga que sube o que baja.

El modelo

Se utilizó Arena® (Rockwell Software) para desarrollar modelos de apoyo en la toma de decisiones para el transporte fluvial. Los datos de entrada son suministrados por un archivo en Excel®, el cual incluye codificación en Visual Basic y es almacenado en contadores creados en Arena® para correr los

escenarios globales, compuestos por más de doscientas mil celdas. Tan pronto como la corrida se termina, la información se entrega de igual forma, a través de Visual Basic y finalmente en un archivo en Excel®.

El modelo representa dos escenarios: con y sin convoy libre. Este último simula las condiciones actuales de las operaciones para viajar transportando producto, en este caso petróleo, a lo largo del río, y su carga y descarga en los puertos principales: un origen y un destino.

El proceso inicia con el ingreso, en la hoja de datos de “entradas”, del período (fecha de inicio y fin) o, en otro caso, el número de horas por las cuales el modelo deberá correrse. Luego se determina el factor de ajuste que representa numéricamente las variaciones en las condiciones internas y externas del transporte de carga en Colombia, información histórica con tendencia a desajustarse al intentar aproximar el modelo de simulación a la realidad. Esto lleva a realizar inferencias estadísticas que ajustan la información a las condiciones actuales. El factor de ajuste varía entre 0 y 2, donde 1 son las condiciones reales de las operaciones; en la medida en que se acerca a 0 representa efectos negativos por condiciones climáticas fuertes y complicadas para la navegación, y cuando tiende a 2 muestra condiciones verdaderamente favorables para las operaciones.

Por otro lado, la opción de aumentar en el modelo la longitud del río a más de 630 km permite su implementación exitosa en el caso de cualquier otro río en el mundo. La hoja de entradas también sirve para activar el número de remolcadores y saber con cuáles es deseable correr el modelo.

Cada remolcador tiene su identificación (ID), la cual representa el nombre con el que su información asociada se almacenó en Arena®, luego sigue la tabla de máximas capacidades (en toneladas y barriles). Esta información es constante y depende de la capacidad de cada remolcador. Igualmente, al inicio de la simulación se determina el número de botes disponibles y lo que transportan (no intercambiable), bien sea producto negro (petróleo crudo) o blanco (petróleo refinado), así como las

toneladas (ton.) que varían entre 1 y 1.500. Con esta información es posible asignar el número de botes que serán parte del convoy.

Dicha asignación se hace empleando un algoritmo de búsqueda tabú con el propósito de minimizar la capacidad sobrante del remolcador y así poder transportar la mayor carga posible en cada viaje programado. Para esto, el algoritmo realiza una asignación inicial global, basado en la información de los botes organizada en matrices. Si luego de ser verificada esta asignación resultara ser viable, entonces el algoritmo la asocia con el remolcador en turno de espera de carga, en caso de no serlo, genera un nuevo valor explorando opciones cercanas a la inicial (local). Si encuentra una mejor solución toma el nuevo valor, de lo contrario el algoritmo conserva el valor de la asignación anterior e intenta nuevas comparaciones. Con el objeto de no quedarse con el mejor valor local (región que incluye el valor inicial y las exploraciones vecinas), el algoritmo realiza la búsqueda dando saltos globales a otras regiones distintas a la ya revisada. Si en esta nueva región encuentra una mejor solución, toma el nuevo valor. En caso contrario, mantiene el valor anterior y continúa la búsqueda hasta agotar el número de exploraciones locales y globales predefinidas al inicio de la simulación.

En el modelo, la carga se especifica de acuerdo con la fracción que será llevada, lo que se refiere al porcentaje de carga seca e hidrocarburos que será transportada. No necesariamente los botes deben contener el 100% de su capacidad, debido al hecho de que esta depende del nivel del río y de si el convoy sube (contra la corriente) o baja (a favor de la corriente). **En una hoja diferente del archivo en Excel® se establece cuál es el porcentaje de utilización de cada remolcador que viaja desde un puerto a otro a recibir mantenimiento, o que va de regreso al puerto de origen debido a causas internas o externas.** Por último, se utilizan hojas que especifican los tiempos de cada remolcador y la distribución que se ajusta en cada caso (tiempos constantes).

El primer escenario presenta la opción de trabajar con un convoy libre en el puerto de origen, lo cual permite incrementar el movimiento de botes para que el remolcador pueda liberarse y seguir con

otro viaje, mientras el convoy termina de cargar o descargar productos en el puerto, con el propósito de mejorar el proceso y facilitar la disponibilidad para un mayor número de viajes.

Resultados

Para validar el modelo desarrollado fue necesario comparar los resultados históricos de la compañía en el año 2005, con los obtenidos luego de correr el modelo que representa la situación actual de la empresa en los dos escenarios. Para verificar si la información se ajusta a la realidad, una prueba *t*-pareada se aplicó al conjunto de datos.

Los resultados se muestran como sigue:

Prueba *t*-pareada

$$\begin{aligned} H_0 &: \mu_1 = \mu_2 \\ H_a &: \mu_1 \neq \mu_2 \end{aligned}$$

Donde *H*₀ sugiere que las medias de los resultados reales frente a los simulados son iguales y, por el contrario, *H*_a sugiere que las medias de los resultados reales son diferentes. Con un nivel de confianza del 95% la hipótesis nula resultó ser aceptada, lo cual indica que no existe evidencia estadística suficiente para rechazar la igualdad entre las medias de ambos tipos de resultados.

Con respecto al experimento estudiado, teniendo en cuenta que es de tipo no replicado, se hace necesario estudiar la interacción entre los dos factores fijos (remolcador y tipo de escenario), lo cual se analizó aplicando la prueba Tukey.

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{Hay evidencia de interacción.} \\ H_a &: \text{No existe evidencia de interacción.} \end{aligned}$$

Con igual nivel de confianza que en la prueba *t*-pareada (95%), resultado rechazada la hipótesis nula, lo cual se traduce en que no existe evidencia estadística suficiente para aceptar la interacción entre los factores fijos.

Prueba de Bartlett (varianzas)

Esta prueba de homocedasticidad pretende confirmar la igualdad de la varianza del modelo.

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{Todas las varianzas son iguales.} \\ H_a &: \text{Al menos una varianza no es igual.} \end{aligned}$$

Con un nivel de confianza del 95%, no existe evidencia estadística suficiente para rechazar *H*₀, lo que indica que todas las varianzas son iguales. Con esto se concluye que el modelo ha sido validado, demostrando formalmente que los datos fueron obtenidos en las mismas condiciones de operación.

Comparación de los escenarios principales:

Con y sin convoy libre

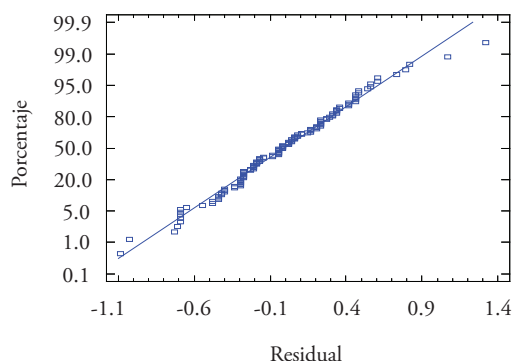
Para conocer cuál de los dos escenarios en estudio ofrece las mejores condiciones de operación para el transporte fluvial según el modelo desarrollado, se diseñó un experimento preliminar para luego calcular el tamaño de muestra *n* trabajando con un nivel de confianza (*1-α*) del 95%, potencia (*1-β*) del 90% y permitiendo un corrimiento máximo de la media igual a un viaje. Dadas estas condiciones, resultó para este caso de estudio que la muestra debe ser de tamaño *n* igual a seis. Luego se corrió el modelo con cinco réplicas para cada uno de los escenarios de interés.

Con el objeto de verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad en los datos, se generó una gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados para el factor remolcador y para el factor tipo de escenario (ver gráficos 1 y 2).

Analizando los residuales de ambos factores, para el caso de los estandarizados del factor remolcador, se observa una tendencia ascendente y regular, lo que indica que la población de los datos se ajusta a una distribución normal. En los residuales estandarizados del factor tipo de escenario, se observa una violación considerable del supuesto de normalidad, ante lo cual quedan dos opciones para el análisis: realizar una prueba no paramétrica, o excluir del factor tipo de escenario el tratamiento remolque 11, dado que es atípico y afecta finalmente la tendencia normal. En este caso particular se tomó la segunda opción, y una vez excluido se realizó un nuevo análisis de varianza (Anova).

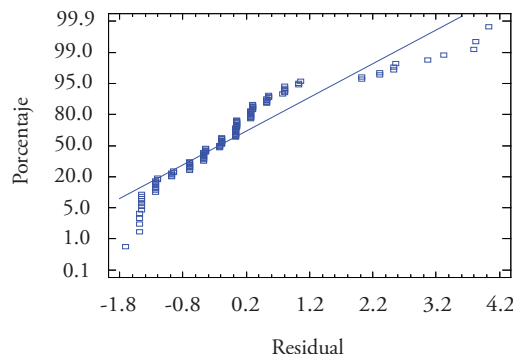
Con respecto al factor remolcador, se tiene de nuevo que existe una diferencia de medias dado que los remolcadores en estudio presentan características y condiciones de operación diferentes.

Gráfico 1. Probabilidad normal para los residuales estandarizados del factor remolcador



Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 2. Probabilidad normal para los residuales estandarizados del factor tipo de escenario



Fuente: Resultados de la investigación.

Prueba LSD de Fisher

El Cuadro 1 presenta la agrupación de remolcadores con el criterio de la prueba LSD de Fisher para comparar pares de media de los remolcadores, donde cada grupo representa entonces una población particular.

Comparando las medias poblacionales, las hipótesis planteadas son:

$$H_o : \mu_i = \mu_j$$

$$H_a : \mu_i \neq \mu_j$$

Estadístico de prueba:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}}$$

Criterio de rechazo:

$$\text{Si, } \left| \bar{y}_i - \bar{y}_j \right| > LSD$$

Los grupos se forman de acuerdo con el número de viajes promedio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Agrupación de remolcadores con el criterio de la prueba LSD

Grupo	Remolcadores
1	2 – 4
2	1 – 7
3	3 – 9 – 10
4	3 – 6 – 9
5	9 – 6 – 8
6	5 – 6 – 8

Con respecto al factor tipo de escenario, resultó que también existe una diferencia de medias. Se aplicó también la prueba LSD y, basados en sus resultados, se puede decir que con un nivel de confianza del 95% el modelo con convoy libre arroja una media poblacional mayor en cuanto a número de viajes que la media arrojada por el modelo cuando trabaja sin convoy libre.

Sobre la interacción de los dos factores fijos, a diferencia del resultado obtenido en la validación inicial del modelo en el que se indicaba que no era significativa, para este nuevo diseño sí resulta serlo. Esta interacción existe dado que:

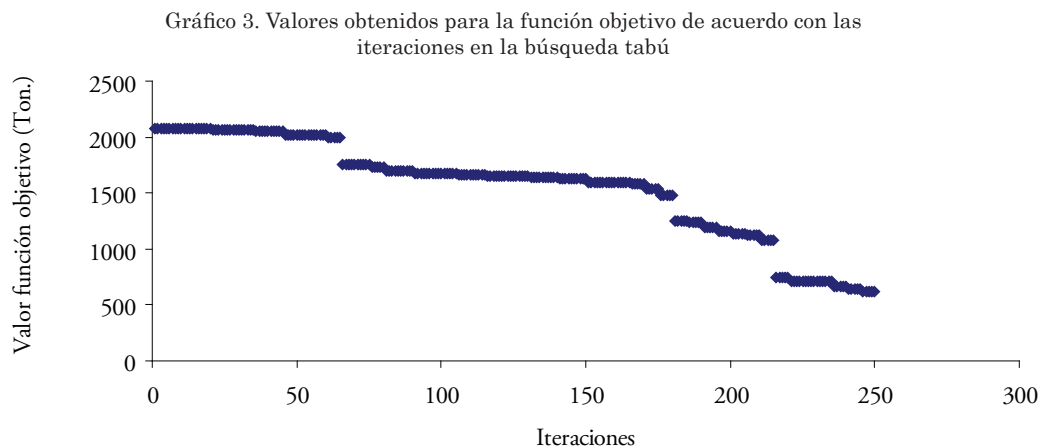
1. En caso de no encontrarse botes disponibles a la llegada de un remolcador al puerto, este deberá esperar hasta ser cargado para cumplir con su capacidad.
2. En caso de encontrarse botes disponibles, son tomados por el remolcador, pero si no cumple con la restricción de capacidad, deberá igual esperar hasta completar la carga para poder partir.
3. La cantidad de botes asignados a un remolcador varía dependiendo de la capacidad de cada remolcador y de la capacidad de cada bote.

Se verificó el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad para entonces aceptar la hipótesis nula, lo que implica aceptar que las varianzas son iguales y con esto valida el experimento.

Para el análisis del tratamiento antes excluido (remolcador 11), se aplicó una prueba f para determinar la igualdad o diferencia de las varianzas poblacionales. Una vez resultó que las varianzas eran iguales, entonces se aplicó la ecuación correspondiente para el análisis de medias con la prueba t . Con esto resultó que para este remolcador en particular, los dos tipos de escenarios hacen igual número de viajes, por este motivo eran atípicos en el Gráfico 2.

Búsqueda tabú

El análisis se hizo para el caso de solo un remolcador en solo una asignación. Comparando el valor de la carga máxima permitida en el remolcador en estudio con el valor de la carga transportada (el cual se obtuvo en varias secuencias aplicando el algoritmo de la búsqueda tabú), se obtienen en cada caso diferentes valores de la función objetivo para minimizar la capacidad no utilizada en el remolcador (Gráfico 3).



Fuente: Resultados de la investigación.

Conclusiones

Los modelos para apoyar la toma de decisiones con base en simulación y optimización heurística son herramientas importantes para automatizar la planeación y programación de las operaciones de transporte. Los pronósticos sobre las condiciones de operación en el río incrementan significativamente el desempeño y la calidad de la planeación.

Este tipo de modelos permiten gestionar inversiones de capital y optimizar las actividades sobre presupuestos, esto debido a que los resultados impactan las decisiones en la capacidad de carga.

Como fue mencionado, el modelo fue validado de acuerdo con las especificaciones de una empresa colombiana dedicada al transporte fluvial, repre-

sentando con esto sus condiciones particulares de operación. Actualmente, todos los escenarios factibles han sido considerados por la empresa.

Referencias

- Bondorfer, Ralf; Martin Grottschel y Andreas Lobel. "Optimization of transportation systems", ZIB-Report 98-09.
- Cornell, Gary. (s. f.) Manual de Visual Basic 5. McGraw-Hill.
- Fabregas A. Aldo; Wadnibar R. Rodrigo; Paternina A. Carlos; y Mancilla H. Alfonso. *Simulación de sistemas productivos con Arena®*. Barranquilla. Ediciones Uninorte.

- Paixão, Ana C. y Marlow, Peter B., (2002) Fourth generation ports - a question of agility? *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 33 n.º 4, 355-376.
- Rios Insua, David. Rios Insua, Sixto. Martin, Jacinto. (s. f.) *Simulación, método y aplicaciones*, Alfaomega.

