

# Planificación del transporte de aprovisionamiento en obras portuarias

## Planning of site supply transport for port works

**Jose Luis Moura Berodia.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Departamento de Transporte y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria. mourajl@unican.es*

**Luigi dell'Olio.** Ingeniero Civil. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Burgos. ldelloio@ubu.es*

**Angel Ibeas Portilla.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Departamento de Transporte y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria*

**Resumen:** Frecuentemente la ejecución de grandes obras infraestructurales, generan impactos significativos sobre el medio provocados por el transporte de importantes cantidades de material requeridas. Esto se agudiza aun más si la ubicación es en ámbito urbano, provocando serios problemas de congestión de tráfico, emisión de contaminantes, polvo y ruido. En este artículo se presenta un modelo de simulación-optimización para la planificación de dicho sistema de transporte de abastecimiento, aplicándolo al caso de la construcción del nuevo puerto de Laredo (España), donde se calcula el reparto modal de carga entre camiones y barcasas con el objetivo de minimizar costes totales del sistema, desde un punto de vista económico, social y medioambiental.

El coste total del sistema, se compone de los costes de operación de los camiones, el coste de operación de las barcasas y un coste de tipo social que representa el coste sobre los usuarios de transporte privado por el incremento de la congestión provocada por el flujo de los camiones en la red vial. Todo ello sujeto a restricciones medioambientales, asegurando que los flujos compuestos de vehículos privados y camiones no sobrepasan los límites de emisión de contaminantes y de ruido. Finalmente, consecuencia del análisis de los resultados junto con el pertinente análisis de sensibilidad se presentan una serie de interesantes conclusiones para una correcta gestión del sistema de transporte analizado.

**Palabras Clave:** Planificación, Transporte, Aprovisionamiento, Puertos

**Abstract:** The construction of large infrastructural works frequently causes considerable environmental impact as a result of the transport of large quantities of materials. This impact is further heightened when the work is located in an urban environment and tends to lead to serious traffic congestion problems together with pollution, dust and noise.

This article presents a simulation-optimization model for the planning of site supply transport, applied to the construction of the new Laredo harbour (Spain), which calculates the modal distribution of loads between lorries and barges in order to minimize the total costs of the system from an economic, social and environmental point of view.

The total cost of the system is composed of the operational costs of lorries and barges and a public related cost which represents the costs affecting private transport users as a result of traffic jams caused by the increased number of lorries on the roads. This is also subject to environmental restrictions in order to ensure that the combined flow of private vehicles and lorries does not exceed contamination and noise pollution limits.

From the analysis of the results and on the basis of the pertinent sensitivity study, a number of interesting conclusions may be reached regarding the correct management of the transport system under study.

**Keywords:** Transport, Planning, Supply, Ports

## 1. Introducción

Como bien es conocido, el creciente volumen de transporte por carretera de viajeros y mercancías está contribuyendo a una mayor presión sobre el medio ambiente. Las medidas adoptadas en la actualidad para contrarrestar dicha tendencia sólo están consiguiendo, a lo sumo, desacelerar la tasa de crecimiento. Como aspecto positivo, es de destacar que las últimas innovaciones tecnológicas están permitiendo reducir, pese a estos crecientes volúmenes de tráfico, los niveles de contaminación atmosférica generados por el transporte por carretera.

Sin embargo, se necesita aun un mayor esfuerzo para resolver el problema de la contaminación atmosférica y acústica en el ámbito urbano, ambas potenciadas por el constante incremento de la congestión del tráfico en la urbe. En este escenario es donde se concentran fundamentalmente los impactos medioambientales negativos producidos por el transporte.

En este ámbito urbano, suele ser habitualmente donde se desarrollan importantes obras infraestructurales, y donde cabe hacerse la siguiente pregunta ¿Cómo planificar el transporte de aprovisionamiento de materiales a grandes obras infraestructurales minimizando, además de costes de operación, impactos sobre el habitante y el medio?

En este artículo, se trata de responder a la anterior pregunta, presentando un modelo de optimización-simulación para planificar el sistema de transporte de aprovisionamiento de una importante obra portuaria desarrollada en ámbito urbano, en base a la minimización de costes totales del sistema, permitiendo conseguir una actividad sostenible desde la perspectiva social, económica y medioambiental.

## 2. El caso de estudio

La obra portuaria en la cual se aplica el modelo de optimización-simulación para planificación del sistema de transporte de aprovisionamiento es la construcción del nuevo puerto deportivo-pesquero de Laredo (Cantabria-España).

El Gobierno de la Comunidad Autónoma de Cantabria a través de su Dirección General de Puertos y Costas, consciente de los enormes impactos medioambientales que este tipo de obra portuaria puede generar sobre las personas y espacios naturales y urbanos del entorno próximo, ha prestado especial cuidado y atención al problema de transporte de materiales de dicha obra. Un transporte de gran volumen de materiales que se concentrará durante el tiempo

## 1. Introduction

*The growing volume of private and goods vehicles on our roads is placing even more pressure on the environment. The measures adopted to offset this tendency have purely served to slow down this growth rate. One positive aspect is that in spite of these growing traffic volumes, technological innovation has managed to reduce the levels of atmospheric pollution created by road transport.*

*However, greater efforts are required to solve the problems of atmospheric and noise pollution in urban areas as a result of the ever-increasing traffic congestion in our towns and cities and where the negative environmental impacts caused by transport are essentially concentrated.*

*These urban areas tend to be the location of important infrastructural works and this then raises the question on how to plan the transport of material supplies to these large work sites while, at the same time, minimizing the impact on the public and the environment and reducing operational costs.*

*This article attempts to answer this question by presenting an optimization-simulation model to plan the supply transport system to an important port work being built in an urban environment and one which seeks to minimize the total costs of the transport system while ensuring sustainable activity from a social, economic and environmental point of view.*

## 2. Case Study

*The optimization-simulation model for the planning of site supply transport has been applied to the construction of the new Laredo fishing harbour and marina in Cantabria (Spain).*

*The Port and Coast Department of the Autonomous Region of Cantabria were well aware of the enormous impacts that these types of port works could have on the population and on the natural and urban areas in the vicinity of the same and have, subsequently, placed special care and attention to the problem of transporting materials to site. The transport of a large volume of materials throughout the duration of the works will inevitably cause large-scale traffic problems in the area at specific times of the day.*



Fig. 1. Futuro puerto de Laredo/The new Laredo harbour.

de duración de la obra, contribuyendo al problema de la congestión de tráfico, de forma puntual pero de enorme magnitud.

Esta importante obra (61.267.730,64 €) se desarrolla en el mismo punto donde se ubica actualmente el puerto pesquero, es decir, se sitúa en el centro histórico de la ciudad, siendo necesario que las mercancías atraviesen aquellas calles más congestionadas para acceder al mismo. Ver figura 1.

La obra portuaria va a constar de tres dársenas, dos de ellas deportivas y una pesquera. Con ello se consiguen 11.300 m<sup>2</sup> de nueva dársena pesquera y un total de 1.084 atraques para embarcaciones deportivas, además de 180 atraques para embarcaciones menores.

El esquema constructivo del puerto está constituido por un espigón de planta curva de algo más de 700 metros, un dique vertical de unos 250 metros y dos islas unidas entre si por un istmo y, mediante un acceso longitudinal de 240 metros, con tierra (ver Figura 2).

*These large scale harbour construction works (€61,267,730.64) are being built on the same site as the current fishing harbour which backs on to the old centre of the city. As a result all goods vehicles will have to pass through streets which are already heavily congested in order to reach the site. See Fig. 1.*

*The harbour work will consist of three basins, two being employed as a marina and one as a fishing harbour. The works will provide a new 11,300 m<sup>2</sup> fishing harbour and offer 1,084 berths for yachts and an additional 180 berths for small craft.*

*The construction layout of the harbour consists of a curved outer breakwater some 700 metres long, a vertical sea wall some 250 metres long and two islands interconnected by an isthmus and connected to the shore by a 240 m longitudinal approach (see Fig. 2).*



Fig. 2. Planta del nuevo puerto de Laredo/Plan of the new Laredo harbour.

Las principales características de tales elementos son:

- Dique rompeolas exterior:
  - Talud de manto principal y espaldón: 2/1.
  - Bloques cúbicos de 65 toneladas, que aumentan a 97 toneladas en el morro.
- Contradique vertical:
  - Sección de 9 metros de anchura, cimentada sobre un enrase de grava a cota -3.5 metros.
- Espigón o muelle de separación de las dársenas deportivas:

The main characteristics of these harbour constructions are:

- Outer breakwater
  - Main armour and berm: 2/1
  - 65 ton cubic blocks, increasing to 97 tons at the head.
- Vertical seawall
  - 9 metre wide section set on a rubble base at a level of -3.5 metres.
- Jetty or separation pier between the marina basins

- Sección trapezoidal de núcleo de escollera de 100 kg. y taludes laterales 1/1 de escollera de 300 a 100 kg.

- Su coronación de 21 metros de anchura permite dos carriles para vehículos (de 3.5 metros), dos zonas de aparcamiento de 5 metros de profundidad y dos paseos desde los que acceder a las pasarelas para llegar a los fingers.

- Islas artificiales e istmo:

- Se protegerán con escollera de entre 700 y 1500 kg. en el lado exterior, con talud 2/1, y con escollera de entre 300 y 1000 kg. en el lado interior, con talud 1/1.

- El núcleo central del istmo será de escollera de entre 25 y 100 kg.

- La coronación tendrá 12 metros de ancho, con paseos peatonales de 2 metros y viales de ida y vuelta en el centro para vehículos.

A la vista de las posibilidades ofrecidas por el entorno del punto donde se desarrolla la obra, se consideran factibles dos modos alternativos de transporte para aprovisionar de material a la obra. Estos modos son.

- Utilizando camiones de obra que circularán por las calles de la propia villa de Laredo.
- Utilizando barcazas, que partiendo de un puerto de embarque cercano a la villa de Laredo, transporten el material por vía marítima.

### **3. El modelo de optimización**

El enfoque utilizado para el cálculo del número de camiones y barcazas necesario se basa y fundamenta en la minimización del coste total del sistema, que está conformado por el coste de los operadores de camiones, de los operadores de barcazas y de los automovilistas que verán aumentado su nivel de costes producto de la mayor congestión inducida por el flujo de camiones de carga. Luego, el reparto óptimo será aquel que minimice los costes totales del sistema, definido por los tres agentes descritos (camiones, barcazas y usuarios de la red vial).

Este enfoque permite abordar la resolución del problema a través de programación matemática bi-nivel. En el nivel superior, se define una estructura de costes totales del sistema, conformada por los tres agentes relevantes: operadores de camiones, operadores de barcazas y automovilistas. Los automovilistas son relevantes en este caso ya que, producto de la congestión que pueden inducir los camiones, aumentarán los costes percibidos por

- Trapezoid core section in 100 kg rubble and 1/1 rubble mound sides in 300 to 100 kg rubble.

- 21 metre wide crest providing two lanes for vehicles (3.5 metres), two 5 m wide parking areas and two footpaths to reach the walkways to the landing stages.

- Artificial islands and isthmus:

- Protected with 700 to 1500 kg rubble on the outer side and with a 2/1 talus, and by 300 to 1000 kg rubble on the inner side with a 1/1 talus.

- The central core of the isthmus will be formed in 25 - 100 kg rubble.

- The crest will be 12 metres wide, with 2 metre wide footpaths bordering a road for two-way traffic.

*In view of the possibilities offered by the site location, two alternative means of transport were considered for supplying materials to site:*

- Using lorries which would have to pass through the streets of Laredo.
- Using barges or lighters which would leave from a port close to Laredo and transport materials by sea.

### **3. Optimization model**

*The focus employed for the calculation of the necessary number of lorries and barges was based on the minimization of total costs. These costs being composed of the cost of lorry transport operators, those of barge operators and those of road users who would incur greater costs as a result of the increased traffic congestion resulting from the coming and going of lorries to and from site. The optimum distribution would then be one minimizing the total costs of the system defined by these three factors (lorries, barges and road users).*

*This focus allows the solving of the problem by two-tier mathematical programming. At the upper tier a structure is defined for the total cost of the system, formed by the three relevant factors: lorry operators, barge operators and road users. The road users are relevant in this case as the costs incurred by the same would increase as a result of the potential traffic congestion caused by lorries. If there were no*

los ellos. Si no existiera congestión, el análisis se realizaría directamente a partir de los costes de ambos operadores (camiones y barcasas), ya que los automovilistas no se verían afectados. Adicionalmente, se consideran una serie de restricciones para el nivel superior que impide que el flujo compuesto de vehículos y camiones en todos arcos sea superior al flujo que alcanza los límites de emisión de contaminantes ( $PM_{10}$ , CO,  $NO_x$  y  $SO_x$ ) y de contaminación acústica.

En el nivel inferior, por su parte, se considera un problema de optimización que entrega como resultado una asignación de automóviles de acuerdo al primer principio de Wardrop. Sin embargo, el flujo de camiones afectará el equilibrio de Wardrop de los automovilistas producto de la congestión.

Para definir la función objetivo del nivel superior, es necesario determinar expresiones analíticas para los costes de los tres agentes involucrados: operadores de camiones, operadores de barcasas y automovilistas.

### 3.1. Función de costes

Como ya se mencionó, el coste total del sistema se define como la suma del costo de operación de los camiones, de las barcasas y de los usuarios:

$$C_{total} = C_{camion} + C_{barcasas} + C_{usuariosautomovil} \quad (1)$$

$$C_{camion} = \sum_T C_c \cdot (T_c^t \cdot f_c^t) \cdot F_t \quad (2)$$

$$C_{barcasas} = \sum_T C_b \cdot (T_b^t \cdot f_b^t) \cdot F_t \quad (3)$$

$$C_{usuariosautomovil} = \sum_T \sum_a (C_a (f_{a,v}^t, f_{a,c}^t) \cdot f_{a,v}^t) \cdot F_t \quad (4)$$

donde:

$C_c$ : coste unitario de operar un camión promedio (€/hora).

$f_c^t$ : frecuencia de camiones durante el período de modelación  $t$  (camiones/hora).

$T_c^t$ : tiempo del trayecto operado por el camión ida y regreso, mas tiempos de carga y descarga (horas).

$C_b$ : coste unitario de operar una barcaza promedio (€/hora).

$f_b^t$ : frecuencia de barcasas durante el período de modelación  $t$  (barcasas/hora).

$T_b^t$ : tiempo del trayecto operado por cada barcaza ida y regreso, mas tiempos de carga y descarga (horas).

$F_t$ : factor de ponderación representativo de la duración de cada período de modelación en el tiempo total de ejecución de la obra.

$C_a(f_{a,v}^t, f_{a,c}^t)$ : coste total de operación en el arco  $a$  durante el período de modelación  $t$  (€/hora).

possibility of traffic congestion the analysis would be made directly on the basis of the costs of both operators (lorries and barges) as road users would not be affected. Furthermore, a series of restrictions has been considered for this upper level which prevent the combined flow of vehicles and lorries in all arcs from exceeding pollution emission limits ( $PM_{10}$ , CO,  $NO_x$  and  $SO_x$ ) and noise pollution levels.

The lower tier, in turn, considers a problem of optimization and provides an allocation of vehicles in accordance with the first Wardrop principle. However, the flow of lorries will affect the Wardrop equilibrium of the road users as a result of traffic congestion.

### 3.1. Cost function

As indicated above, the total cost of the system is defined as the sum of the operation costs of lorries, barges and road users:

$$C_{total} = C_{camion} + C_{barcasas} + C_{usuariosautomovil} \quad (1)$$

$$C_{camion} = \sum_T C_c \cdot (T_c^t \cdot f_c^t) \cdot F_t \quad (2)$$

$$C_{barcasas} = \sum_T C_b \cdot (T_b^t \cdot f_b^t) \cdot F_t \quad (3)$$

$$C_{usuariosautomovil} = \sum_T \sum_a (C_a (f_{a,v}^t, f_{a,c}^t) \cdot f_{a,v}^t) \cdot F_t \quad (4)$$

$$C_{camion} = C_{lorry}$$

$$C_{barcasas} = C_{barges}$$

$$C_{usuariosautomovil} = C_{roadusers}$$

Where:

$C_c$ : unit cost of operating a standard lorry (€/hour)

$f_c^t$ : lorry frequency during modelling period  $t$  (lorries/hour).

$T_c^t$ : outward and inward travel time per lorry together with loading and unloading times (€/hour)

$C_b$ : unit cost of operating standard barge (€/hour)

$f_b^t$ : frequency of barges during model period  $t$  (barges per hour)

$T_b^t$ : outward and inward travel time per barge together with loading and unloading times (€/hour)

$F_t$ : representative weighting factor of the length of each modelling period within the total construction time

$C_a(f_{a,v}^t, f_{a,c}^t)$ : total operation cost in the arc during modelling period  $t$  (€/hour)

$f_{a,v}^t$  : flujo de vehículos en el arco a durante el período de modelación t (vehiculos/hora).

$f_{a,c}^t$  : flujo de camiones en el arco a durante el período de modelación t (camiones/hora).

Notar que  $f_{a,c}^t$  es igual a  $f_c^t$

Por otro lado, es importante hacer notar que si se desea transportar una carga total de Q durante un determinado tiempo, es factible transportar  $Q^t$  en un subperíodo t, de tal forma que:

$$Q = \sum_t Q^t \quad (5)$$

Esta carga  $Q^t$  puede ser transportada en camión o en barcaza, por lo que:

$$Q^t = q_c^t + q_b^t \quad (6)$$

Para transportar  $q_c^t$  unidades durante el período t, con camiones cuya capacidad promedio es de  $K_c$ , se requeriría la siguiente frecuencia de camiones  $f_c^t$ :

$$q_c^t = f_c^t \cdot K_c \quad (7)$$

Análogamente, para transportar unidades  $q_b^t$  durante el período t, con barcasas cuya capacidad promedio es de  $K_b$ , se requeriría la siguiente frecuencia  $f_b^t$ :

$$q_b^t = f_b^t \cdot K_b \quad (8)$$

Luego, reemplazando de (7) y (8) dentro de (6) se obtiene:

$$Q^t = f_c^t \cdot K_c + f_b^t \cdot K_b \quad (9)$$

Por lo tanto, se observa claramente el carácter de sustitución perfecta entre camiones y barcasas. Luego, dependiendo de los costes de cada modo de transporte, y del impacto que se generaría sobre los usuarios de automóviles, se deberá determinar cuánto transportar en cada alternativa.

Por lo tanto, los costes totales del sistema se pueden definir de la siguiente manera:

$$C_{Total} = \sum_t C_c \cdot (T_c^t \cdot f_c^t) \cdot F_t + \sum_t C_b \cdot (T_b^t \cdot f_b^t) \cdot F_t + \sum_t \sum_a (C_a^t (f_{a,v}^t, f_{a,c}^t) \cdot f_{a,v}^t) \cdot F_t$$

$$C_{Total} = \sum_t C_c \cdot (T_c^t \cdot f_c^t) \cdot F_t + \sum_t C_b \cdot \left( T_b^t \cdot \left( \frac{q_b^t}{K_b} \right) \right) \cdot F_t + \sum_t \sum_a (C_a^t (f_{a,v}^t, f_{a,c}^t) \cdot f_{a,v}^t) \cdot F_t$$

$$C_{Total} = \sum_t C_c \cdot (T_c^t \cdot f_c^t) \cdot F_t + \sum_t C_b \cdot \left( T_b^t \cdot \left( \frac{Q^t - K_c \cdot f_c^t}{K_b} \right) \right) \cdot F_t + \sum_t \sum_a (C_a^t (f_{a,v}^t, f_{a,c}^t) \cdot f_{a,v}^t) \cdot F_t$$

$f_{a,v}^t$  : vehicle flow in the arc during modelling period t (vehicles/hour)

$f_{a,c}^t$  : lorry flow in the arc during modelling period t (lorries/hour)

Note that  $f_{a,c}^t$  is equal to  $f_c^t$ .

It is also of note that if a total load Q has to be transported over a specific time, it is possible to transport  $Q^t$  in a sub-period t, and whereby:

$$Q = \sum_t Q^t \quad (5)$$

This load  $Q^t$  may be carried by lorry or barge, and as such:

$$Q^t = q_c^t + q_b^t \quad (6)$$

In order to transport  $q_c^t$  units over period t, using lorries with an average capacity of  $K_c$ , the following frequency of lorries will be required  $f_c^t$ :

$$q_c^t = f_c^t \cdot K_c \quad (7)$$

Similarly, in order to transport  $q_b^t$  units over period t by barges with an average capacity of  $K_b$ , this will then require the following frequency of  $f_b^t$ :

$$q_b^t = f_b^t \cdot K_b \quad (8)$$

When substituting (7) and (8) in (6) we obtain:

$$Q^t = f_c^t \cdot K_c + f_b^t \cdot K_b \quad (9)$$

This clearly reveals the ready interchange between lorries and barges and in accordance with the costs of each mode of transport and the impact caused to road users, it is then possible to establish the amounts to be transported by each alternative.

The total costs of the system may then be defined in the following manner:

Luego, debe encontrarse un reparto que minimice esta última expresión. Es interesante notar que si aumenta el transporte en camión, este modo aumenta su coste, pero el coste de operación de la barcaza se reduce (y viceversa).

Del mismo modo, si existe congestión, una mayor carga en camión inducirá un aumento en los costes de los automovilistas.

### 3.2. Restricciones medioambientales

El número de camiones admisible y su distribución por la red viaria de Laredo no sólo depende de las repercusiones de este tráfico pesado en el tráfico vehicular (menores niveles de servicio, congestión, demoras...), sino que también está condicionado por las repercusiones ambientales que lleva asociadas.

El análisis medioambiental realizado se centra en dos aspectos fundamentales: la concentración de contaminantes derivados del tráfico de vehículos y los niveles de ruido originados por esa misma causa.

Por cada contaminante que emite el conjunto de vehículos y camiones circulando por la ciudad surge una restricción al nivel superior del problema de optimización. Los contaminantes estudiados son: PM<sub>10</sub> (partículas suspendidas), CO (monóxido de carbono), NO (compuestos de nitrógeno), SO (compuestos de azufre) y contaminación acústica.

- Restricción para el contaminante atmosférico de tipo *i*, en el arco *a* y período de modelación *t*, función del flujo vehicular compuesto de camiones y automóviles. (Osses y Henriquez, 1990) y (Gallardo, 1997).

$$\frac{FE_{ik} \cdot \left( f_{a,autos}^t + \left( (f_c^t \cdot \delta_c^t) \cdot ve^c \right) \right) \cdot C_{ak} \cdot L_a}{u} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left( \frac{4}{2\sigma_y^2} + \frac{4}{2\sigma_z^2} \right)} \leq \limite_i$$

- Restricción para contaminación acústica, en el arco *a* y período de modelación *t*. También función del flujo vehicular compuesto de camiones y automóviles. (Caschetta, 1998).

$$L_0 + 10 \cdot \log \left( f_{a,autos}^t + \left( (f_c^t \cdot \delta_c^t) \cdot ve^c \right) \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{d_0}{d} \right) + \Delta L_{\text{extras}} \leq \limite_{\text{RUIDO}}$$

### 3.3. Modelo de asignación de tráfico privado

Por otro lado es necesario recurrir al uso de un modelo de asignación de tráfico privado que proporcione información sobre el coste del usuario de las distintas combinaciones de carga en camión evaluadas.

*It is then necessary to find a distribution which minimizes this latter formula. It is of note than on increasing lorry transport, this mode goes up in price but the cost of barge operation goes down (and vice versa).*

*Similarly, where there is traffic congestion, a greater load carried by lorry will lead to increased costs for road users.*

### 3.2. Environmental restrictions

*The admissible number of lorries and the distribution of the same on the roads of Laredo does not purely depend on the repercussions of this heavy traffic on all road users (reduced service levels, traffic jams, delays ...), but is also conditioned by the associated environmental repercussions.*

*The environmental study carried is based on two fundamental aspects: the concentration of pollutants as a result of traffic and the noise levels caused by the same.*

*Restrictions arise in the upper tier of the optimization problem for each pollutant emitted by the vehicles and lorries passing through the town. The pollutants considered are: PM<sub>10</sub> (suspended particles), CO (carbon monoxide), NO (nitrogen compounds) and SO (sulphur compounds) and noise pollution.*

- *Restriction for atmospheric pollutant type *i* in arc *a* and over model period *t*, as a function of combined lorry and car traffic flow. (Osses and Henriquez, 1990) and (Gallardo, 1997).*

- *Restriction for noise pollution in arc *a* and over model period *t*, as a function of combined lorry and car traffic flow. (Caschetta, 1998).*

### 3.3. Private traffic allocation model

*It is also necessary to resort to a private traffic allocation model which provides information on user costs under the different lorry load combinations evaluated.*



Los modelos de asignación de transporte privado con mayor fundamento técnico, utilizan el conocido primer principio de Wardrop (Wardrop, 1956) para explicar la asignación de viaje a la red.

*“En el equilibrio ningún usuario puede reducir el coste de su viaje mediante cambio de ruta”.*

Este primer principio de Wardrop, también denominado DUE (deterministic user equilibrium), supone que los usuarios intentan minimizar sus costes de operación al realizar sus viajes. Si pudieran hacerlo, cada usuario elegiría la ruta más corta (en términos de tiempo de viaje, por ejemplo) para llegar a su destino. Pero, puesto que en general existe el fenómeno de la congestión vehicular, la ruta más corta deja de serlo cuando muchos usuarios tratan de usar los mismos arcos de la red. Los usuarios entonces considerarán otras rutas, hasta encontrar aquella que tenga el mínimo coste posible, dadas las condiciones de operación existentes en la red. Cuando todos los usuarios hayan encontrado esta ruta más conveniente, la red de transporte privado se encontrará en equilibrio.

Beckman y McGuire (1956) formularon el siguiente problema que expresa la condición de equilibrio según el primer principio de Wardrop denominado problema de asignación de tráfico (PAT).

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & Z = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} c_a(x) dx \\ \text{s. a} \quad & \\ & \sum_{p \in P_w} h_p = T_w \quad \forall w \in W \\ & f_a = \sum_{p \in P} \delta_{ap} h_p \quad \forall a \in A \\ & h_p \geq 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall w \in W \end{aligned}$$

Donde:

$W$ : conjunto de todos los pares O/D conectados en el grafo  $G(N,A)$

$w$ : un par de nodos  $(i,j)$

$P$ : conjunto de todas las rutas (caminos) percibidos en  $G(N,A)$

$P_w$ : conjunto de todas las rutas que conectan el par  $w$

$T_w$ : total de usuarios que viajan en el par  $w$

$h_p$ : flujo de usuarios que utilizan la ruta  $p$

$f_a$ : flujo de usuarios que utilizan el arco  $a$

$c_a$ : costo en el arco  $a$

### 3.4. Modelo de optimización definitivo y algoritmo de resolución

Dados los antecedentes descritos, para determinar el reparto óptimo de carga entre camiones y barcazas, se debe resolver el siguiente problema de optimización bi-nivel:

*Private transport allocation models with greater technical grounding employ Wardrop's first principle (Wardrop, 1956) to explain journey allocation to a road network*

*“At equilibrium, no road user may reduce their travel costs by changing route”.*

*Wardrop's first principle, which is also known by the acronym DUE (deterministic user equilibrium), supposes that road users will attempt to minimize their operation costs when making their journeys. Where possible, each road user will select the shortest route (in terms of travel time, for example) to reach their destination. However, as there frequently tends to be traffic congestion, the shortest route no longer remains so when many road users attempt to use the same arcs of the road network. Road users then consider other routes, until finding one that entails the lowest possible cost given the existing operating conditions in the road network. When all users find this most convenient route, the private transport system will then be in equilibrium.*

*Beckman and McGuire (1956) formulated the following problem which expresses the equilibrium condition following Wardrop's first principle, and one referred to as the traffic allocation problem (TAP).*

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & Z = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} c_a(x) dx \\ \text{s. a} \quad & \\ & \sum_{p \in P_w} h_p = T_w \quad \forall w \in W \\ & f_a = \sum_{p \in P} \delta_{ap} h_p \quad \forall a \in A \\ & h_p \geq 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall w \in W \end{aligned}$$

Where:

$W$ : group of all connected O/D pairs in graph  $G(N,A)$

$w$ : pair of nodes  $(i,j)$

$P$ : combination of all routes (roads) considered in  $G(N,A)$

$P_w$ : combination of all routes connecting pair  $w$

$T_w$ : total road users travelling on pair  $w$

$h_p$ : flow of users using route  $p$

$f_a$ : flow of users using arc  $a$

$c_a$ : cost in arc  $a$

### 3.4. Definite optimization model and solution algorithm

*In accordance with the background information given above, in order to establish the optimum load distribution between lorries and barges, it is then necessary to solve the following two-tier optimization problem:*

$$\left. \begin{aligned}
 & \text{Función objetivo / Objective function:} \\
 & \text{Min-} C_{\text{Total}} = \sum_{\tau} C_c \cdot (T_c^t \cdot f_c^t) \cdot F_t + \sum_{\tau} C_b \cdot \left( T_b^t \cdot \left( \frac{Q^t - K_c \cdot f_c^t}{K_b} \right) \right) \cdot F_t + \sum_{\tau} \sum_{\alpha} \left( C_{\alpha}^t (f_{\alpha,v}^t, f_{\alpha,c}^t) \cdot f_{\alpha,v}^t \right) \cdot F_t \\
 & \text{Restricciones / Restrictions:} \\
 & \frac{FE_{ik} \cdot \left( f_{\alpha,autos}^t + \left( (f_c^t \cdot \delta_c^t) \cdot ve^c \right) \right) \cdot C_{\alpha k} \cdot L_{\alpha}}{u} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left( \frac{4}{2 \cdot \sigma_y^2} + \frac{4}{2 \cdot \sigma_z^2} \right)} \leq \text{limite}_i \\
 & L_0 + 10 \cdot \log \left( f_{\alpha,autos}^t + \left( (f_c^t \cdot \delta_c^t) \cdot ve^c \right) \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{d_0}{d} \right) + \Delta L_{\text{extras}} \leq \text{limite}_{\text{RUIDO}}
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \text{Minimizar / Minimize } Z = \sum_{\alpha \in A} \int_0^{f_{\alpha}} c_{\alpha}(x) dx \\
 & \text{s.t.} \\
 & \sum_{p \in P_w} h_p = T_w \quad \forall w \in W \\
 & f_{\alpha} = \sum_{p \in P} \delta_{\alpha p} h_p \quad \forall \alpha \in A \\
 & h_p \geq 0, \quad \forall p \in P, \quad \forall w \in W
 \end{aligned} \right\}$$

En cuanto a la forma de resolver el problema planteado y dadas sus especiales características, los métodos utilizados en la resolución no deben requerir cálculo de derivadas o hessianos de la función objetivo.

Esta situación obliga a emplear métodos de solución que no requieran de una expresión analítica del gradiente de dicha función y por lo tanto se recurre a métodos algoritmos de tipo heurístico.

Dentro de estos métodos se encuentra el algoritmo de Hooke-Jeeves, entre cuyas ventajas destacan el no exigir ningún atributo especial de la función objetivo, lo que ha motivado su elección como algoritmo de búsqueda de la solución óptima.

El algoritmo no requiere convexidad de dicha función ni una expresión analítica explícita de sus derivadas con respecto a las variables de decisión del problema. Sí requiere que la función sea continua y evaluable para cualquier valor factible de las variables.

Para más detalle sobre este y otros algoritmos para resolución de problemas de programación binivel consultar (Codina et al, 2003) y (Castillo et al, 2002).

#### 4. Aplicación

Para la aplicación práctica y una vez analizadas las posibles rutas de acceso por carretera se han determinado dos rutas (ver Figura 3). Un primer recorrido transcurre por la vía más directa de acceso al puerto que sin duda se congestionaría con facilidad. Esto ha motivado plan-

In order to solve the problem raised and given the special characteristics of the same, the methods employed in the solution do not require the calculation of derivatives or Hessians of the objective function.

This situation makes it necessary to employ solution methods which do not require an analytical expression of the gradient of this function and it is, therefore, necessary to resort to heuristic methods and algorithms.

These latter methods include the Hooke-Jeeves algorithm. One of the main advantages of this algorithm is that it does not require a specific attribute of the objective function and this has, subsequently, been selected as a search algorithm for the optimum solution.

The algorithm does not require the convexity of the function nor an explicit analytical expression of its derivatives with regards to the decision variables of the problem. However, it does require that the function be continuous and evaluable for any feasible value of the variables.

For further details regarding this and other algorithms to solve two-tier programming problems, consult: (Codina et al, 2003) and (Castillo et al, 2002).

#### 4. Application

After studying possible approach routes by road, two routes (see Figure 3) were established for practical application. The first route runs along the most direct route to the harbour and one which will undoubtedly

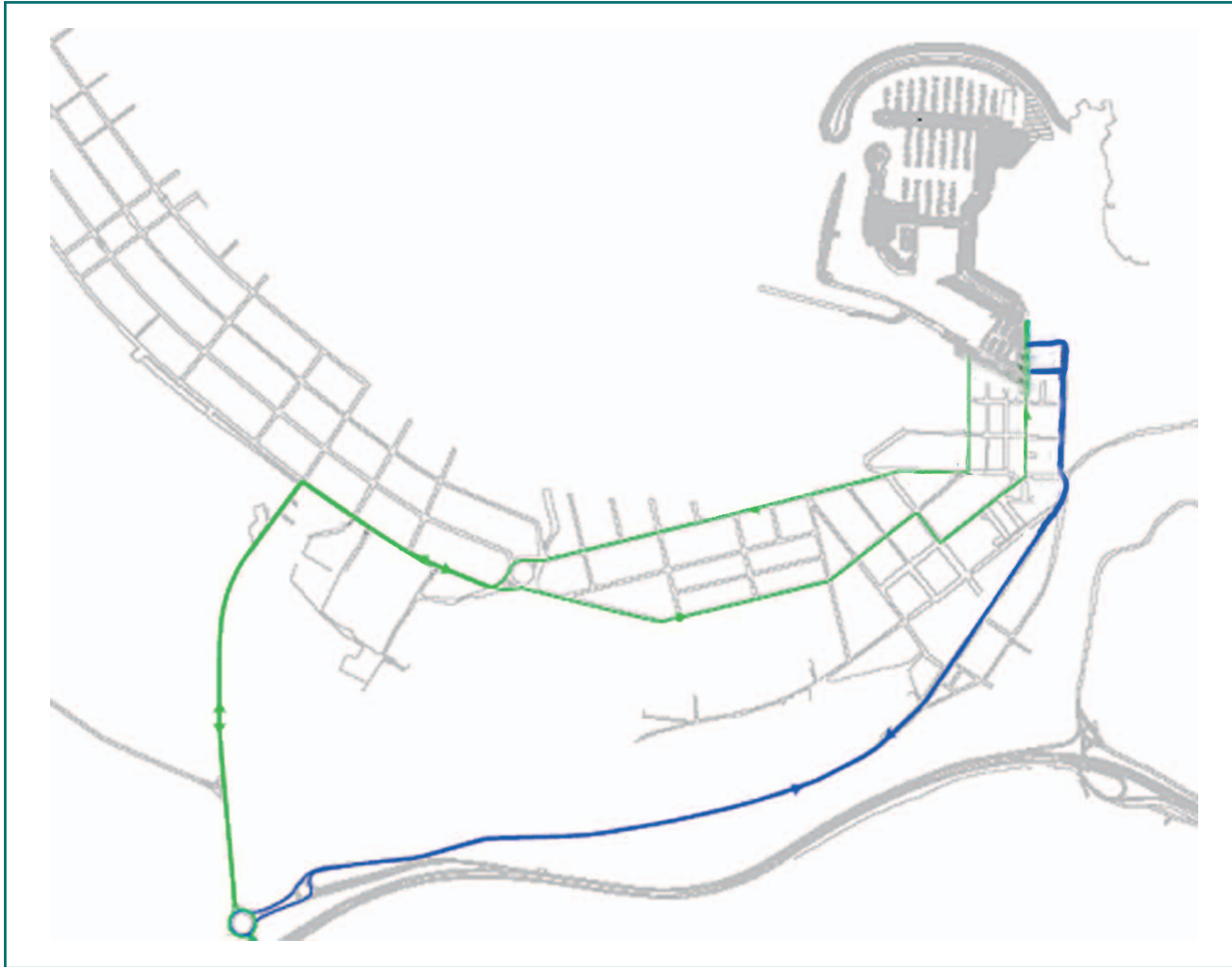


Fig. 3. Plano de rutas de camiones/Plan of lorry routes.

tear una segunda ruta, un poco más larga en distancia y que accede al puerto por las calles más cercanas a la playa.

Las rutas son de uso complementario, de forma que la ruta que transcurre por el centro de la villa se utilizará durante todo el año, mientras que la segunda ruta, la que transcurre cercana a la playa, no se utilizará en verano por las molestias generadas en los accesos a la playa.

Para poder aplicar el modelo de programación binivel planteado ha sido necesario realizar una revisión de la información contenida en el Proyecto del Nuevo Puerto de Laredo, en cuanto a las necesidades y requerimientos de materiales de abastecimiento a la obra.

En el anexo final se exponen los dos cronogramas de obra analizados diferenciándose uno del otro en la ubicación de la planta de hormigonado: con planta de hormigonado fuera del puerto y con planta de hormigonado dentro del puerto.

En dichos cronogramas, se desglosa los requerimientos de materiales por unidad de obra en cantidades a

block very easily. This has led to the consideration of a second route which is slightly longer in terms of distance and which reaches the harbour by roads close to the beach.

The routes are complementary and while the route running through the centre of the town may be used throughout the whole year, the second route, running alongside the beaches, may not be used in summer due to the disturbance caused to beach approaches.

In order to apply the two-tier programming model it has been necessary to analyse information contained in the Project for the New Laredo Harbour with regards to the needs and requirements for materials on site.

The final annexe includes two work schedules which vary in accordance with the positioning of the concrete mixing plant: one with the concrete plant outside the harbour and one with the plant within the harbour.

The two schedules give a breakdown of the material requirements per work unit in terms of transported quantities and time schedules, with indication of lorry

**Tabla 1. Periodos de tráfico considerados para la aplicación práctica en Laredo**  
*Table 1. Traffic periods considered for practical application in Laredo*

Periodo/Period	Meses/Months	Horas/Hours
Verano - hora punta <i>Summer- peak time</i>	Del 1 de Julio al 30 de Septiembre <i>From 1 July to 30 September</i>	De 9:00 a 11:00, de 14:00 a 16:00 y de 19:00 a 21:00 <i>From 9:00 to 11:00, from 14:00 to 16:00 and from 19:00 to 21:00</i>
Verano - hora valle <i>Summer- trough time</i>	Del 1 de Julio al 30 de Septiembre <i>From 1 July to 30 September</i>	De 00:00 a 9:00, de 11:00 a 14:00, de 16:00 a 19:00 y de 21:00 a 24:00 <i>From 00:00 to 9:00, from 11:00 to 14:00, from 16:00 to 19:00 and from 21:00 to 24:00</i>
Invierno <i>Winter</i>	Del 1 de Octubre al 30 de Junio <i>From 1 October to 30 June</i>	De 00:00 a 24:00 <i>From 00:00 to 24:00</i>

transportar y ubicación temporal, se presenta el cronograma en unidades de camiones. A partir de un camión tipo (camión bañera 20m<sup>3</sup> 375 CV), se han transformado las cantidades de materiales en unidades de camión, obteniendo de este modo los periodos de requerimientos de materiales en unidades de camión, si todo el material se transportase en camión.

Para lograr aplicar el modelo también es necesario datos relativos a la caracterización temporal del tráfico de la ciudad de Laredo. Al no existir estudios previos ni matrices de origen-destino se hizo necesario realizar un estudio de tráfico.

En virtud de los datos tomados y de su posterior análisis, se determina la existencia de hora punta y hora valle en el periodo de verano, mientras que en el de invierno sólo cabe hablar de hora media al no haber una clara distinción punta-valle (ver Tabla 1) por las especiales características de la ciudad.

Llegados a este punto es factible combinar los periodos de requerimientos de materiales de abastecimiento a la obra con los distintos periodos de tráfico considerados. Esta combinación determinará aquellos periodos de modelación que deben ser considerados en el modelo, periodos con distintas cantidades de material o/y diferentes condiciones del tráfico en la ciudad.

Para determinar las capacidades de camiones y barcasas se ha recurrido a un análisis de la oferta actual existente, tanto de camiones como de barcasas, que sea factible de utilizar en el entorno de las obras portuarias a desarrollar.

*units. The material quantities have been transformed into lorry units on the basis of a standard lorry (20m<sup>3</sup> tipper lorry 375), and this then gives the material requirements periods in lorry units if all the material were to be carried by lorry.*

*In order to apply the model it was also necessary to have details regarding the seasonal and hourly characteristics of traffic in Laredo. As no previous studies or guidelines were available, it was necessary to carry out our own traffic study.*

*From the information obtained and subsequent study, it was found that there were peak and trough times during the summer, while in winter it was only possible to refer to mean times as there was no clear distinction between peaks and troughs (see table 1) on account of the particular characteristics of the town.*

*At this point it is feasible to combine the period requiring material supplies to site and the different traffic period considered. This combination will determine the modelling periods to be taken into account in the model, periods with different material quantities and/or different traffic conditions in the town.*

*In order to establish the capacity of lorries and barges, a study was made of the lorry and barge types which could be employed within a harbour work environment of this nature.*

*On the basis of this study it was decided to select a 20m<sup>3</sup> tipper lorry 375 as the standard lorry for the transport of materials through the streets of Laredo. The operational costs of these lorries was set at 45 € per hour in*

**Tabla 2. Tiempos de ciclo para rutas de camiones**  
*Table 2. Cycle times for lorry routes*

	Ruta 1 de Camiones <i>Lorry Route 1</i>	Ruta 2 de Camiones <i>Lorry Route 2</i>
Tiempo desde abastecimiento a entrada en Laredo <i>Time from supply point to entrance of Laredo</i>	1 hora	1 hora
Tiempo de ruta interior en Laredo <i>Time crossing Laredo</i>	0,25 horas	0,27 horas
Tiempos de carga y descarga <i>Loading and unloading times</i>	0,25 horas	0,25 horas
<b>Total del ciclo/Total cycle</b>	<b>2,75 horas</b>	<b>2,79 horas</b>

**Tabla 3. Tiempos de ciclo para barcasas**  
*Table 3. Time cycles for barges*

	Ruta de barcasas <i>Barge route</i>
Tiempo de puerto de embarque a Laredo <i>Time from loading port to Laredo</i>	1,25 horas
Tiempos de carga y descarga <i>Loading and unloading times</i>	2,33 horas
<b>Total del ciclo/Total cycle</b>	<b>4,83 horas</b>

En base a lo anterior se ha decidido tomar como camión medio para el transporte de materiales por las calles de Laredo, el camión bañera 20m<sup>3</sup> 375 CV. En cuanto a coste de operación de los mismos y basándose en precios de principios del año 2.005 para Cantabria, este se fija en 45 €/hora.

En cuanto a la tipología de barcaza, existe una amplia gama que va desde aquellas con capacidad de 150 m<sup>3</sup> y velocidades de 6-8 nudos (si esta cargada o descargada) hasta aquellas de 750 m<sup>3</sup> y velocidades de 15-20 nudos. En cuanto al coste de operación este se mueve en una horquilla entre 200 y 240 €/hora.

En base a lo anterior, y condicionados por el poco calado en el entorno de la obra, se decide que el tipo de barcaza a considerar en este análisis será una barcaza de 250 m<sup>3</sup> (considerando la capacidad potencial igual a la real) de capacidad (tamaño adecuado para trabajar en el entorno de la obra) a un coste de operación de 220 €/hora.

Para determinar finalmente los tiempos de ciclo se hace uso de las distancias medias del punto de abastecimiento a Laredo y al puerto de embarque. Tomando como velocidad media del camión circulando por las carreteras regionales hasta llegar a Laredo en 50 km/hora y la velocidad de barcaza en 15 km/hora, se calculan los tiempos de viaje mostrados en Tabla 2.

Notar que para el cálculo de tiempo de ciclo total de camiones, este se compone del tiempo de ruta interior en Laredo más tiempos de carga y descarga y más dos veces el tiempo desde abastecimiento a Laredo y viceversa.

En cuanto al tiempo de ciclo de las barcasas, es el mostrado en la Tabla 3.

Notar que para el cálculo de tiempo de ciclo total de barcasas, este se compone de dos veces (ida y retorno) el tiempo desde el puerto de embarque a Laredo más los tiempos de carga y descarga.

## 5. Resultados

A partir de los datos anteriormente recopilados se han definido un total de 8 alternativas de estudio, definidas según varié: si la planta de hormigonado esta fuera o dentro del puerto, si del material de dragado se reutiliza el 100% o el 25% y si la duración de jornada laboral es de 12 horas o de 16 horas.

Tanto la variación de jornada laboral, como la variación en el porcentaje de material de dragado a reutilizar, a si como la ubicación de la planta de hormigonado, afectan a los requerimientos de material por hora. La cuantía horaria de material para cada alternativa es la mostrada en el anexo Datos.

*accordance with local prices established at the beginning of 2005.*

*With regards to the type of barge or lighter to be selected, there is a wide range running from those with capacities of 150 m<sup>3</sup> and speed of 6 - 8 knots (loaded and unloaded speeds) to larger vessels with 750 m<sup>3</sup> capacities and offering speeds of 15 - 20 knots.*

*In view of the above and the small draught available around the site, we opted for a barge with a 250 m<sup>3</sup> capacity (when considering the potential capacity to be equal to real capacity), this being suitable for work in the site area and offering operational costs of 220 /hour.*

*In order to establish the cycle times, reference was made to the average distances from supply points to Laredo and the port of loading. The travel times shown in Table 2 were calculated on the basis of an average lorry speed of 50 kph on regional roads to Laredo and barge speeds of 15 kph.*

*The total cycle time calculation of lorries includes loading and unloading times, the time take from the point of supply to Laredo and the return trip, and the time taken within the town.*

*The time cycle for barges is indicated in Table 3.*

*The total time cycle for barges is composed of the outward and inward trips between the loading port and Laredo and loading and unloading times.*

## 5. Results

*On the basis of the data indicated above, a total of 8 study alternatives were defined, based on the following variables: location of concrete mixing plant inside or outside the port; the reuse of 100% or 25% of dredged material; working days of 12 or 16 hours.*

*Variations in working day, variations in the percentage of reused dredged material and the location of the concrete mixing plant all affect the hourly supply requirements. The hourly quantity of material for each alternative is shown in the Data annexe.*

*Each of these alternatives has been applied to the optimization-simulation model proposed in this paper in order to obtain the optimum solution for each alternative.*

*After analysing the solutions for each of these alternatives, and in accordance with the results summarized in Table No. 5, the most important results for each of these may then be seen to refer to:*

- Average hourly cost, optimization variable and representative cost of the entire system. This cost includes the cost of operating the lorries and barges and the congestion costs incurred by the road user as a result of increased traffic.*

Tabla 4. Alternativas estudiadas  
Table 4. Alternatives studied

Alternativa Alternative	Planta de hormigonado Concrete mixing plant	Reutilizando del dragado Reuse of dredged material	Jornada laboral Working day
1	En puerto/ <i>In port</i>	100%	12 horas
2	En puerto/ <i>In port</i>	100%	16 horas
3	En puerto/ <i>In port</i>	25%	12 horas
4	En puerto/ <i>In port</i>	25%	16 horas
5	Fuera puerto/ <i>Outside port</i>	100%	12 horas
6	Fuera puerto/ <i>Outside port</i>	100%	16 horas
7	Fuera puerto/ <i>Outside port</i>	25%	12 horas
8	Fuera puerto/ <i>Outside port</i>	25%	16 horas

Tabla 5. Síntesis de resultados para las 8 alternativas  
Table 5. Results summary for 8 alternatives

Alternativas Alternatives	Coste medio Horario (€) Mean hourly cost (€)	Cantidad a transportar (m <sup>3</sup> ) Quantity to be transported (m <sup>3</sup> )	% camión % lorry	% barcaza % barge
1	1.382,21	709.075,20	92,0	8,0
2	1.019,97	709.075,20	98,4	1,6
3	1.400,58	816.421,56	89,9	10,1
4	1.203,89	816.421,56	94,0	6,0
5	1.549,05	919.059,84	89,5	10,5
6	1.266,20	919.059,84	95,4	4,6
7	1.659,82	1.031.148,96	85,8	14,2
8	1.409,07	1.031.148,96	94,1	5,9

Cada una de estas alternativas, se ha aplicado el modelo de optimización-simulación aquí propuesto obteniéndose una solución óptima para cada alternativa.

Analizando las soluciones de cada una de estas alternativas se puede sintetizar en la tabla 5. los resultados mas importantes de cada una de ellas:

- Coste medio horario, variable de optimización y coste representativo de todo el sistema. No hay que olvidar que este coste incluye el coste de operar los camiones, el coste de operar las barcazas y el coste de congestión que sufre el usuario por el incremento del tráfico.
- Cantidad a transportar, que varía de una alternativa a otra al cambiar el porcentaje de material de dragado y la ubicación de la planta de hormigonado.
- Porcentaje de reparto modal del transporte, es decir del total de material a transporta durante la completa duración de la obra, cuanto debe ser transportado en camión y cuanto en barcaza.

Además de estos importantes resultados, hay que destacar que el verdadero resultado aportado por el modelo no es solo el reparto modal en porcentaje, sino el completo calendario de circulación de camiones por época del año, periodo del día, modo de transporte y ruta considerada.

En concreto para la alternativa numero 1, se determinan las variables de optimización, las frecuencias de las dos rutas de camiones, definiendo el calendario o programación de transporte para la duración total de la obra que logran minimizar costes totales (de operación y congestión) y cumpliendo restricciones medioambientales.

Este calendario para la alternativa 1 es el mostrado en la figura 4. En el se detalla para cada periodo de modelación la frecuencia de camiones para la ruta de ca-

- Quantities to be transported, which varies from one alternative to another on changing the percentage of dredged material and the location of the concrete mixing plant.
- Percentage modal distribution of transport in reference to the total material to be transported throughout the work and the amounts to be transported by either lorry or barge.

In addition to these important figures, it is also necessary to underline that the real result provided by the model is not just the percentage modal distribution, but the complete schedule for the circulation of lorries according to time of year, time of day, mode of transport and route.

In terms of alternative number one, this establishes the optimization variables, the frequency of the two lorry routes and defines the transport schedule or programme for the whole period of the work while minimizing total costs (operation and congestion) and complying with environmental restrictions.

The schedule for alternative 1 is given in figure 4. For each modelling period, the schedule shows the frequency of lorries of lorry route 1, the material to be transported and the percentage total for the period. The same information is given with regards to lorry route 2 and the barges.

In accordance with the average hourly costs for each alternative, these may then be represented in graphic form (see Fig. 5)

From the graph it may be seen that the optimum alternative would be that of number 2, with the concrete mixing plant within the port, reusing 100% of dredged materials and a 16 hour working day.

This alternative is subsequently the most recommendable alternative, in spite of the fact that it might not be possible to entirely control some of the variables employed in the alternatives (location of

PLANTA DE HORMIGONADO EN PUERTO																
Reutilizando 100% de dragado. Jornada laboral de 12 horas																
Año	Mes	Horario	Dias	Material	Camión - Ruta 1				Camión - Ruta 2				Barcaza			
					Cam. hora	Tot. cam.	Tot. mate	%	Cam. hora	Tot. cam.	Tot. mate	%	Tot. mate	%		
2006	Marzo	8:00 - 20:00	22	55	1	264	3168	5739	0	0	-3113	-5639	0	0		
	Abril	8:00 - 20:00	18	23956	5	1080	12960	54	5	998	10996	46	0	0		
	Mayo	8:00 - 20:00	22	52441	8	2112	25344	48	9	2376	27097	52	0	0		
	Junio	8:00 - 20:00	21	51300	8	2016	24192	47	9	2268	27108	53	0	0		
	Julio	Horas punt	19	28649	16	1824	21888	76	0	0	0	0	6761	24		
		Horas vall	19	28649	17	1938	23256	81	0	0	0	0	5393	19		
	Agos.	Horas punt	22	13606	9	1188	13606	100	0	0	0	0	0	0		
		Horas vall	22	13606	9	1188	13606	100	0	0	0	0	0	0		
	Sept.	Horas punt	20	13211	10	1200	13211	100	0	0	0	0	0	0		
		Horas vall	20	13211	10	1200	13211	100	0	0	0	0	0	0		
	Oct.	8:00 - 20:00	21	27388	5	1260	15120	55	5	1260	12268	45	0	0		
	Novi.	8:00 - 20:00	21	25416	4	1008	12096	48	5	1260	13320	52	0	0		
Dici.	8:00 - 20:00	18	23686	5	1080	12960	55	5	1080	10726	45	0	0			
2007	Enero	8:00 - 20:00	21	22843	4	1008	12096	53	4	1008	10747	47	0	0		
	Febr.	8:00 - 20:00	20	35561	6	1440	17280	49	7	1680	18281	51	0	0		
	Marzo	8:00 - 20:00	23	51553	8	2208	26496	51	8	2208	25057	49	0	0		
	Abril	8:00 - 20:00	18	67078	8	1728	20736	31	9	1944	23328	35	23014	34		
	Mayo	8:00 - 20:00	22	75168	8	2112	25344	34	9	2376	28512	38	21312	28		
	Junio	8:00 - 20:00	22	45163	7	1848	22176	49	8	2112	22987	51	0	0		
	Julio	Horas punt	19	11197	9	1026	11197	100	0	0	0	0	0	0		
		Horas vall	19	11197	9	1026	11197	100	0	0	0	0	0	0		
	Ago.	Horas punt	22	8940	6	792	8940	100	0	0	0	0	0	0		
		Horas vall	22	8940	6	792	8940	100	0	0	0	0	0	0		
	Sep.	Horas punt	20	5975	5	600	5975	100	0	0	0	0	0	0		
		Horas vall	20	5975	5	600	5975	100	0	0	0	0	0	0		
	Oct.	8:00 - 20:00	21	15563	3	756	9072	58	3	756	6491	42	0	0		
Novi.	8:00 - 20:00	21	15590	3	756	9072	58	3	756	6518	42	0	0			
Dic.	8:00 - 20:00	18	8537	2	432	5184	61	2	432	3353	39	0	0			
709075					19806		407323		11930		245273		35		56479	
Notas		Material total (m <sup>3</sup> )		709075		57,4%				34,6%		8,0%				
		Horas punt: 9:00 - 11:00; 14:00 - 16:00; 19:00 - 21:00						CAMION		92,0 %						
		Horas vall: 00 - 9:00; 11:00 - 14:00; 16:00 - 19:00; 21:00 . 23:00						BARCAZA		8,0 %						
		Cap. de camion		12 m <sup>3</sup>												
		Cap. de barcaza		250 m <sup>3</sup>												

Fig. 4. Calendario o programación de transporte para la Alternativa 1/  
 Transport schedule for Alternative 1.

miones 1, el material a transportar y el porcentaje sobre el total del periodo. De igual manera para la ruta 2 de camiones y para las barcazas.

Atendiendo a los costes medios horarios de cada alternativa, estos pueden ser representados gráficamente (ver figura 5.).

Analizando dicho grafico, la alternativa óptima sería la número 2, con planta de hormigonado dentro del

concrete mixing plant, percentage reuse of dredging and working day). By way of example, the percentage of dredged material which may be reused may vary from that programmed.

As such ,and in view of the results, it may be indicated that in the worst of cases only 25% of the dredged material could be reused and that the other factors concerning the 16 hour working day and the location of

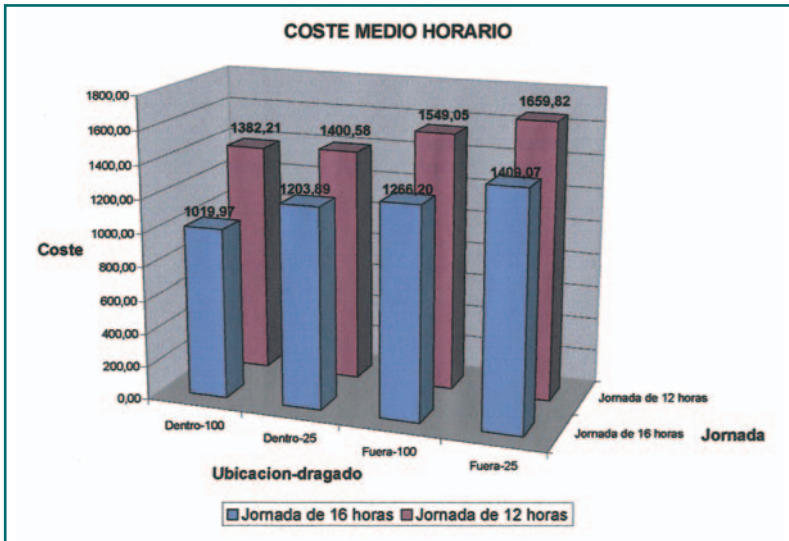


Fig. 5. Costes medios horarios para las 8 alternativas/Average hourly costs for the 8 alternatives.

puerto, reutilizando el material de dragado al 100% y con una jornada de trabajo de 16 horas.

Por lo tanto esta alternativa es la mas recomendable, si bien es cierto que algunas de las variables utilizadas para clasificar las alternativas (ubicación de planta de hormigonado y % de reutilización de dragado y jornada de trabajo) puede que no sean controlables completamente. Por ejemplo, el porcentaje de material de dragado que se pueda reutilizar.

Es por ello que se puede concluir, a la vista de los resultados, que ante la peor situación que sería que únicamente se pueda reutilizar el 25%, siempre se optara por una jornada de 16 horas y se tratará que la planta de hormigonado este en el propio puerto.

Semejante análisis es factible de realizar con la ubicación de la planta de hormigonado. Analizando los resultados se puede afirmar que siempre es más interesante ubicarla dentro del puerto que fuera. Por ello, ante la peor situación de ubicarla fuera del puerto, siempre sería recomendable tratar de trabajar una jornada de 16 horas y utilizar el máximo posible de material de dragado.

En este contexto, la empresa constructora del puerto considera que la utilización de barcazas es problemático por su elevado coste de operación y menor fiabilidad frente al uso del camión. Es por ello que ante esta situación, se evalúa a través de un sencillo análisis de sensibilidad como repercutiría cambios en la función objetivo (coste medio total) cambios en el vector solución (es decir, numero de camiones), con el objetivo de explicar porque existen periodos en los cuales es imposible aumentar aun más el numero de camiones.

Para ello, y tomando la alternativa 1 como ejemplo, a partir de valor de la iteración 9 (en la cual se alcanza el óptimo), se comprueba el sobrecoste de añadir mas camiones en los periodos donde hay transporte en barcaza

the concrete mixing plant, on site, should all remain intact.

A similar analysis may be made with regards to the location of the concrete mixing plant. On analysing the results it may be seen that it is always preferable to locate the plant within the port area and not outside the same. In the case of the worst possible scenario and the positioning of the plant outside the port, it would always be recommendable to ensure a 16 hour working day and to employ the maximum possible amount of dredged material.

In this context the harbour contractors consider that the use of barges or lighter would be complicated on account of their high operating costs and reduced reliability when compared to lorries. In the light of this situation an evaluation was made by simple sensitivity analysis of the repercussions of changes in the vector solution (i.e. number of lorries) in the objective function (total mean cost). This was made with a view to explaining the presence of periods in which it was impossible to increase the number of lorries any further.

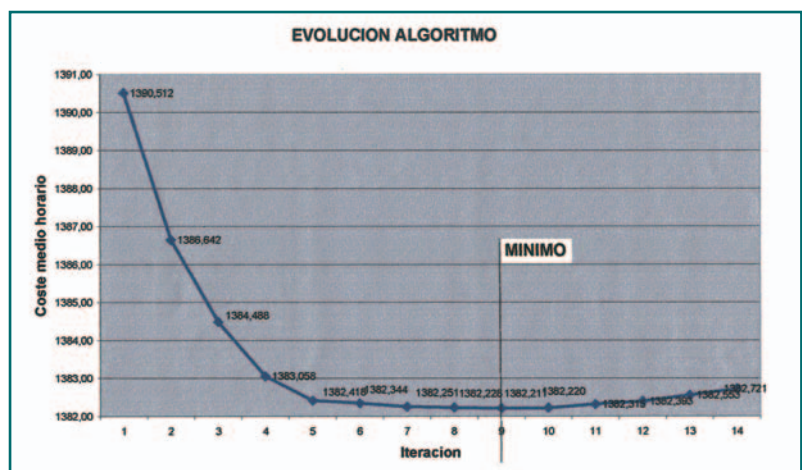
As such, and when taking alternative 1 as an example, a verification was made on the basis of the value of iteration 9 (where the optimum was reached) of the additional costs entailed by adding further lorries in those periods where barge transport had been established and where the environmental restrictions so permitted. See Fig. 6.

When observing the barge transport periods indicated in the alternative, these are seen to be:

- July 2006
- April 2007
- May 2007

As the April and May periods are within the winter season and are the longest periods in time, the pollution

Fig. 6. Evolución de costes medios horarios después del optimo/Evolution of average hourly costs after the optimum.





y las restricciones medioambientales lo permiten. Ver figura 6.

Observando los periodos de transporte en barcaza de la alternativa 1, tenemos que estos son:

- Julio de 2006
- Abril de 2007
- Mayo de 2007

Respecto de los periodos de Abril y Mayo al pertenecer a periodos de invierno y ser los más largos en el tiempo se activan las restricciones de emisión de contaminantes en valores anuales. Por esto a pesar de ser la frecuencia de camiones menores que en otros periodos no es aceptable superar esos valores de ruta 1=8 y ruta 2=9 por las restricciones anuales.

En cambio introducir más camiones en el periodo Julio, no activa restricciones medioambientales pero si incrementan los costes. Estos incrementos de costes son los representados en las figura 6. (a partir de iteración 9).

En la figura 7 se representan los costes desglosados por camiones, barcazas y por congestión. Están referidos a un valor de 100 para la iteración 1 y lógicamente a medida que aumenta el % de camiones se incrementa el coste de camión y congestión y se reduce el de barcazas.

Es importante ver que el coste de congestión crece de forma exponencial, como era de esperar ya que la solución dada en la iteración 9 es la optima, afirmando por tanto que la única posibilidad de reducir completamente el uso de barcazas pasaría por rediseñar el cronograma y evitar las puntas de requerimiento de materiales de los meses Abril y Mayo de 2007. Conviene recordar que la solución optima aquí determinada responde al cumplimiento del cronograma de obra planteado, cualquier modificación de importancia del mismo requeriría evaluar de nuevo el sistema.

## 6. Conclusiones

Las principales conclusiones son:

- El modelo propuesto en esta artículo, a diferencia de planteamientos anteriores, se enfoca desde una perspectiva económica (costes de operadores), social (costes sobre el usuario por congestión) y medioambiental (limitación de emisiones de contaminantes y ruido).
- El modelo propuesto resuelve el problema planteado, con un enfoque mixto de optimización y simulación, considerando la interacción demanda-oferta para los usuarios del transporte privado (en cada

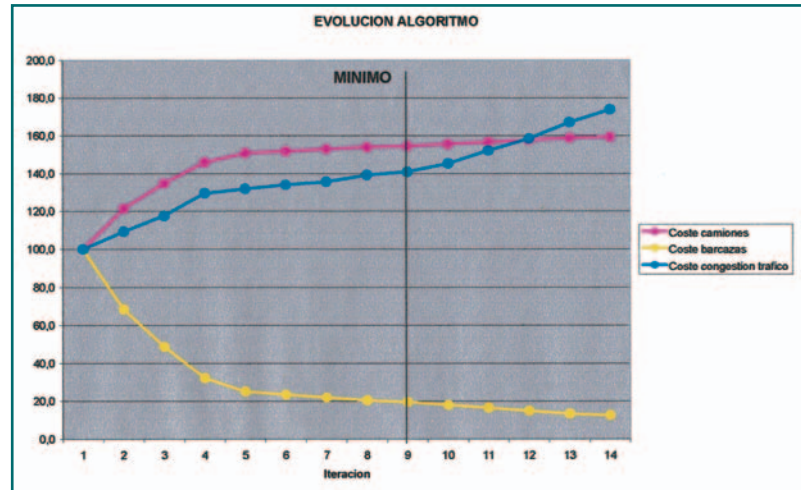


Fig. 7. Evolución de costes camión, barcaza y usuario/  
 Evolution of lorry, barge and user costs.

emission restrictions were considered in annual terms. As such and in spite of the fact that the lorry frequency is lower than in other periods, it is unacceptable to exceed route values 1=8 and 2=9 on account of the annual restrictions.

While the introduction of additional lorries over the July period does not trigger environmental restrictions, it does increase the costs. These cost increases are shown in Fig. 6 (as from iteration 9).

Figure 7 shows the breakdown of costs for lorries, barges and congestion. These refer to a value of 100 for iteration 1 and as the percentage of lorries increases this, logically, increases lorry and congestion costs while reducing that of barges.

It is of note that the congestion cost rises in an exponential manner, as was to be expected, given that the solution of iteration 9 was the optimum. This then demonstrates that the only way of completely reducing the use of barges is to redesign the schedule and avoid the material requirement points over the months of April and May 2007. It should be borne in mind that the considered optimum solution only applies if the established work schedule is complied with and any serious modification to the same would require a new evaluation of the system.

## 6. Conclusions

The main conclusions are:

- The model proposed in this article, as opposed to previous focuses, is made from an economic (operator costs), social (user costs incurred by congestion) and environment perspective (restriction of pollution emissions and noise pollution).

iteración del algoritmo de resolución) permitiendo con ello llegar a resultados más consistentes y coherentes.

- El modelo tiene en cuenta la iteración entre el usuario y las 3 diferentes alternativas (dos rutas de camiones y barcas) de transporte hacia y desde la obra. De hecho el usuario elige entre un conjunto de recorridos que le permiten minimizar el tiempo (coste generalizado de viaje). Claramente su coste generalizado de viaje es función de las frecuencias de los distintos operadores de transporte.
- Las restricciones medioambientales se analizan desde el punto de vista de comprobación de valores de concentración en puntos cercanos al vial, destacando que las comprobaciones se efectúan para límites máximos horarios y valores máximos admisibles anuales para 5 contaminantes. Del análisis de resultados se observa una adecuada correlación entre estos valores y los distintos periodos de tráfico estudiados.

En definitiva con el análisis de las 8 alternativas planteadas se refleja la flexibilidad y versatilidad que aporta el diseño del modelo de optimización-simulación en la planificación de un sistema de transporte como el presentado, permitiendo evaluar multitud de alternativas derivadas de diferentes valores en las variables de decisión del problema.

## 7. Agradecimientos

Se agradece a la Dirección General de Puertos y Costas del Gobierno de la Comunidad Autónoma de Cantabria, por su apoyo en el desarrollo de esta investigación, así como a la UTE FCC-ASCAN por la aportación de los datos para la aplicación práctica. ♦

- *The proposed model solves the problem raised by a combined optimization and simulation focus, considering the supply-demand interaction for private transport users (in each iteration of the resolving algorithm) and subsequently providing more consistent and more coherent results.*
- *The model considers the iteration between the user and the three different transport alternatives (two lorry routes and barges) to and from the site. The user may, in fact, choose from a number of routes in order to minimize travel time (generalized travel cost). This generalized travel cost obviously depends on the frequencies of the different transport operators.*
- *The environmental restrictions have been analyzed in order to verify concentration values at points close to the road. These verifications being made in terms of maximum hourly limits and maximum admissible annual values for 5 pollutants. From an analysis of the results, there is seen to be a suitable correlation between these values and the different traffic periods considered.*

*The analysis of 8 different alternatives reveals the flexibility and versatility provided by the optimization-simulation model in the planning of a transport system such as this, and enables the evaluation of a multitude of alternatives derived from different values in the decision variables of the problem.*

## 7. Acknowledgements

*The authors wish to acknowledge the Port and Coast Department of the Autonomous Region of Cantabria for their support in the development of this research work and the FCC-ASCAN Consortium for the provision of data for the practical application. ♦*

### Referencias/References:

- BECKMAN, M. J., MCGUIRE, C. B. (1956). *Studies in the economics of transportation*. Yale University Press, New Haven, CT.
- CASCETTA, E. (1998). *Transportation systems engineering: theory and methods*. Dordrecht:Torino: Kluwer; UTET.
- CASTILLO, E., CONEJO, A. J., PEDREGAL, P., GARCÍA, R., N. ALGUACIL (2002) *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. Universidad de Castilla la Mancha.
- CODINA, E, GARCÍA, R., MARIN, A. Y VERAS-TEGUI, D. (2003). Programación matemática binivel en planificación del transporte urbano: Estado del Arte y nuevos modelos. Estudios de construcción y transporte.
- GALLARDO, L. (1997). *Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos*. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Santiago.
- OSSES, M., HENRIQUEZ, A. (1990). *Modelo de emisiones vehiculares, MODEM*. XI Congreso Chileno de Ingeniería y Transporte. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- WARDROP, J.G., (1956). *Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II 1(36)*, 325-362.



