

# ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES DE TRANSPORTE DE UNA EMPRESA CONSERVERA NAVARRA A TRAVÉS DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL

JAVIER FAULIN

Departamento de Estadística e Investigación Operativa  
Universidad Pública de Navarra.

FERNANDO JIMENEZ

Departamento de Métodos Estadísticos  
Universidad de Zaragoza.

## RESUMEN

Este trabajo pretende ilustrar la utilidad de una aplicación concreta, perteneciente a los dominios de la programación lineal, en el ámbito de la logística empresarial. Para este fin, se desarrolló un modelo de programación lineal que permite optimizar los costes de transporte, siendo aplicado en una empresa conservera de Navarra. Los resultados obtenidos no se limitaron a la reducción de costes, sino al mejor conocimiento de los factores que influyen en la toma de decisiones. El modelo implementado tiene la ventaja de su flexibilidad: puede ser aplicado de forma general a cualquier empresa que desee optimizar los costes de transporte propio, así como realizar una asignación eficiente de chóferes y vehículos.

## PALABRAS CLAVE

Logística empresarial, actividades del transporte, programación lineal, sector conservero.

## INTRODUCCIÓN

Este artículo responde al estudio de un doble campo de conocimientos: por un lado, el análisis de las actividades logísticas y del transporte dentro del mundo empresarial, lo cual engloba el ámbito de la logística empresarial, y, por otro, el desarrollo de un modelo de programación lineal que permite optimizar los costes de transporte de aprovisionamiento y distribución de una empresa. El objetivo de este trabajo es mostrar la utilidad de la aplicación de un modelo de programación lineal en el ámbito de la gestión diaria de las actividades, como elemento básico en el proceso de toma de decisiones.

Para entender mejor la función del transporte dentro del ámbito empresarial es conveniente conocer las decisiones en relación con el mismo, sabiendo que el objetivo que deben cumplir es que las materias primas y los productos finales lleguen a su destino a tiempo, con el nivel de calidad exigido y en la cantidad prevista.

A la hora de poner en marcha una empresa, dos de las decisiones básicas a tomar hacen referencia al transporte. Por un lado, la *determinación de los modos de transporte* (camiones, barcos, ferrocarril, oleoductos,...) con los que se va a trabajar, y, por otro, la *gestión del transporte*. Ambas son decisiones estructurales y estratégicas, en cuanto que su variación afecta,

en gran medida, a las decisiones que se toman en las empresas: gestión de inventarios, selección de personal, manejo de materiales, inversiones a realizar... De estas dos actividades, la más interesante desde el punto de vista de este artículo, es la segunda, en cuanto implica una toma de decisiones diaria dentro de la empresa, y, por tanto, la que mayor influencia tiene en el resto de las actividades logísticas: elección del canal de distribución, estrategia de red, gestión de inventarios y manejo de materiales y empaquetamiento.

La influencia del transporte en estas actividades justifica, por sí sola, la necesidad de analizar e intentar mejorar la gestión del transporte en una empresa. Además, el interés por las actividades logísticas en el ámbito empresarial se ha reforzado por la mayor incertidumbre económica que vive la sociedad actual, y por el continuo desarrollo tecnológico, que ha dado lugar a que surjan nuevas y más eficientes técnicas de producción y distribución con un menor coste, tanto económico como de tiempo. Todos estos factores han repercutido en el acortamiento del ciclo de vida de los productos y en que todas las actividades que se dan dentro de una empresa pasen a ser analizadas y perfeccionadas de forma casi constante.

Por tanto, una empresa que quiera ser competitiva debe estar al tanto de los cambios tecnológicos para su posible aplicación en el proceso productivo y distributivo de bienes. Este artículo pretende mostrar un ejemplo en el que la aplicación de técnicas cuantitativas, concretamente de la programación lineal, puede no sólo mejorar las actividades de transporte, sino la gestión global de la empresa.

El planteamiento original de este artículo toma como base el modelo del problema de transporte desarrollado por Hitchcock (1941) y Dantzig (1963). Ahora bien, esto no supone que el modelo que se va a desarrollar en este artículo sea una variante del mismo en el sentido matemático del término, tales como las desarrolladas por Szwarc (1973) y Evans (1984), sino que debe ser visto como una *variante de aplicación*. Esto se explica por el hecho de que este artículo desarrolla una situación similar a la del problema del transporte: optimizar los costes de transporte sujeto a un conjunto de restricciones de demanda y oferta. Sin embargo, la complejidad de la situación a analizar obligará a la inclusión de restricciones adicionales, por lo que el modelo desarrollado en este trabajo debe ser comparado con los desarrollados por Gómez y Salazar (1991), Pooley (1994) y Sankaran y Ubgade (1994), en cuanto que en estos artículos sí que existe una similitud, tanto en la situación genérica como en los modelos planteados.

En Gómez y Salazar (1991) se aplica un modelo de programación lineal que minimiza los costes totales de transporte y transformación en el sector remolachero-azucarero español, con el objeto de obtener flujos óptimos de materia prima (remolacha azucarera), desde zonas productoras hacia centros de transformación, y de producto final (azúcar) desde estos hacia zonas de consumo, así como los volúmenes óptimos de elaboración en las diferentes empresas del sector.

Pooley (1994) desarrolla un programa lineal que permite reducir los costes de transporte de aprovisionamiento y distribución en una empresa canadiense de productos lácteos. En este caso, la aplicación del modelo pretendía localizar lugares en los que ubicar nuevas plantas de fabricación, buscaba hallar qué gamas de productos se deberían producir en cada planta, y qué proveedores y clientes deberían servir cada una de las plantas. Por último, en Sankaran y Ubgade (1994) se minimizan los costes de transporte por tonelada de leche recogida por una empresa de productos lácteos de la India.

La información obtenida de estos artículos nos ayudó a construir el programa lineal que se desarrolla y aplica en este artículo, y cuyo objetivo va a ser *facilitar la toma de decisiones de una empresa conservera en la gestión diaria de las actividades de transporte*.

## ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TRABAJO

A la hora de analizar las actividades logísticas de una empresa, es necesario conocer las características generales del sector al que pertenece, además de la estructura de la propia empresa, en cuanto permiten comprender mejor la forma de gestionar y controlar dichas actividades.

### **Sector conservero en Navarra:**

La elección del sector conservero de Navarra como campo de aplicación práctica se decidió, principalmente, en función de dos razones. Por un lado, el pequeño tamaño de las empresas de este sector (en 1995, el número medio de empleados era de 57) hace que éstas no dispongan ni de los medios ni del tiempo necesario para elaborar este tipo de trabajos, por lo que la realización de este estudio podría ser de mucha utilidad para las mismas, a la hora de analizar la eficiencia de las actividades logísticas.

Por otro lado, se determinó que el área geográfica a analizar iba a incluir la Comunidad Foral de Navarra, debido a que la industria conservera es un sector característico de la economía navarra; en la Tabla 1 se puede observar el peso de la industria conservera en Navarra, en comparación con este mismo sector en el ámbito nacional. Las variables utilizadas han sido la producción bruta y la población activa, comparando el porcentaje de participación de la industria conservera dentro del conjunto de la economía, tanto en Navarra como a escala nacional. A partir de estos datos, se comprueba la mayor importancia relativa que tiene el sector conservero en Navarra, respecto al territorio nacional. Así, toda mejora producida en este sector tendrá consecuencias positivas, no sólo para él mismo, sino para la economía de esta provincia en general.

La consulta de bibliografía publicada por el Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes de la Diputación Foral de Navarra (1993, 1994a, 1994b), y las entrevistas realizadas con empresarios del sector conservero han permitido conocer las principales características de esta industria en Navarra: porcentaje mayoritario de trabajadores eventuales, cercanía con la fuente de las materias primas, concentración en una zona concreta, orientación al mercado nacional, y tendencia hacia la diversificación de productos, dándose una pérdida progresiva de los productos tradicionales (conservas de espárrago y pimiento) frente a los productos cocinados, conservas de verduras en tarros de cristal o productos de cuarta gama (verduras envasadas en fresco).

### **Campo de aplicación empresarial:**

Con el objeto de seleccionar una empresa sobre la que desarrollar nuestro estudio, se realizaron entrevistas con gerentes y directores de logística de varias empresas conserveras de Navarra. Los criterios que se tuvieron en cuenta en el proceso de elección fueron, ante todo, los dos siguientes: que fuera representativa dentro del sector conservero, y que existiera la posibilidad de acceder a los datos necesarios para realizar un trabajo serio y completo.

Nos vamos a referir a la empresa elegida con la denominación de ***Conservas H***. La razón de utilizar un nombre ficticio se basa en el deseo de la empresa de mantener la privacidad de los datos ofrecidos por la misma.

***Conservas H*** se encuentra localizada en la zona Medio Oriental de Navarra. La elección de su ubicación como centro de fabricación radicó en la facilidad de contratación de mano de obra, y en la cercanía con los centros de aprovisionamiento y el abaratamiento de los costes de transporte que ello suponía.

**TABLA 1**  
**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA IMPORTANCIA DEL SECTOR CONSERVERO**  
**EN NAVARRA Y ESPAÑA**

AÑO	% del Producto Bruto de la industria conservera sobre el Producto Bruto Total		% de la Población Activa de la industria conservera sobre la Población Activa Total	
	Navarra	España	Navarra	España
1988	4,48%	0,89%	8,86%	1,17%
1989	5,62%	0,85%	8,83%	1,23%
1990	5,03%	0,87%	8,47%	1,24%
1991	5,36%	0,90%	8,52%	1,23%
1992	5,63%	0,97%	8,23%	1,29%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (I.N.E.) y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (M.A.P.A.)

Dentro de los productos elaborados y comercializados por *Conservas H*, los más importantes son las conservas de espárragos y pimientos, y productos cocinados.

En la actualidad, *Conservas H* cuenta con 31 empleados fijos, si bien en las épocas de mayor actividad (campañas del espárrago y del pimiento) el número de trabajadores asciende hasta cerca de 300. De estos empleados, alrededor del 80% son fijos discontinuos, política habitual de contratación en las empresas conserveras.

En cuanto a sus características generales, hay que destacar, por último, la existencia de amplios y numerosos espacios para almacenamiento. Este aspecto es muy importante dentro de *Conservas H*, en cuanto que si bien las campañas de espárrago y pimiento duran entre dos y tres meses, respectivamente, las ventas se realizan a lo largo de todo el año, por lo que la necesidad de espacio y la importancia de los costes de almacenamiento son factores muy importantes dentro de la empresa.

Vistas las características de la empresa, se puede observar cómo muchas de las mismas coinciden con las citadas anteriormente sobre el sector en su totalidad: tendencia hacia la diversificación de productos, gran importancia de los trabajadores eventuales y cercanía con la fuente de materias primas.

La estructura del transporte dentro de *Conservas H* puede ser descrita a través de la Figura 1. La política de la empresa en este sentido tiene dos vertientes: transporte por agencias y transporte propio. Respecto al primero, se ocupa únicamente de la distribución del producto final. La relación de la empresa con las agencias de transporte es la siguiente: los clientes informan a la empresa al principio de cada jornada, sobre los pedidos que desean, especificando lugar, día y hora en las que debe efectuarse la entrega. Una vez enviada la información, es ya la empresa la que se encarga de mandar el producto final con los vehículos propios, bien sea a los almacenes de las agencias o al que la empresa posee en Zaragoza [enlaces (d) y (c) de la Figura



**TABLA 2**  
**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS VEHÍCULOS QUE SON PROPIEDAD DE LA EMPRESA**

VEHÍCULO	CAPACIDAD (kgs.)	TIPO	LTS. CADA 100 kms.	VELOCIDAD MEDIA (Kms./h.)	CARGA/DE S-CARGA (hs.)
1	15.000	Tres ejes	32	85	0,5
2	7.500	Dos ejes	21	85	0,25
3	1.500	Furgoneta	15	90	0,1
4	10.000	Dos ejes	30	80	0,5
5	2.000	Dos ejes	16	85	0,1

Fuente: Datos cedidos por **Conservas H.**

La política de la empresa en el caso del transporte propio es del *día a día*: no existe ninguna planificación de antemano y las rutas se deciden al principio de la jornada. Esta política es habitual dentro del sector: hay que tener en cuenta que los principales clientes de las empresas conserveras son las grandes superficies, las cuales trabajan con niveles de inventario muy bajos. Esto hace que el tamaño de los pedidos que realizan sean pequeños, y que los mismos se deban entregar en un plazo inferior a dos días, lo que imposibilita una planificación a más largo plazo de las actividades del transporte.

### **ESTUDIOS REALIZADOS: DESCRIPCIÓN Y METODOLOGÍA**

A lo largo de las entrevistas realizadas con el director de logística de **Conservas H.**, se llegó a la conclusión de que se podría llevar a cabo el siguiente estudio: *diseñar un programa lineal que permitiera a Conservas H gestionar las actividades diarias de transporte de forma más eficiente*. Con este fin, se desarrolló un programa lineal que minimiza los costes diarios del transporte propio de distribución y aprovisionamiento, a través de las asignaciones chóferes-vehículos y del diseño de rutas, y que permite establecer a la empresa unas pautas de conducta generales en la gestión de estas actividades.

Para probar la factibilidad y eficiencia de este modelo se decidió utilizar los datos referentes a los viajes realizados por los vehículos propios de la empresa durante la *campaña del espárrago de 1995*. La razón por la que se eligió este ámbito temporal fue que representa el período de tiempo, junto a la campaña del pimiento, donde la actividad del transporte propio es más intensa dentro de **Conservas H** y, por tanto, donde más se puede apreciar la utilidad del modelo.

La metodología seguida en este estudio fue la siguiente:

Fase 1) Descripción de la gestión diaria del transporte propio de **Conservas H** durante la campaña del espárrago.

Fase 2) Obtención de los costes de transporte propio, en función de los vehículos y chóferes de la empresa.

Fase 3) Modelización del programa lineal.

Fase 4) Aplicación del programa lineal en **Conservas H**.

La Fase 1 comenzó en octubre de 1995, y la Fase 4 finalizó en mayo de 1996.

### 1) Descripción de la gestión diaria del transporte propio de *Conservas H* durante la campaña del espárrago:

La duración de las campañas de recolección del espárrago no es un dato conocido a priori, en cuanto que depende, en gran medida, de las condiciones climatológicas que se den durante este período. De forma general, suele abarcar los meses de abril, mayo y junio, tal como ocurrió en 1995. Durante este período, el número total de días en que se realizaron labores de recogida ascendió a 62.

Durante la campaña del espárrago, *Conservas H* trabaja del siguiente modo: con un día de antelación se estima el número de kilos que se van a recoger de los distintos centros de aprovisionamiento, a la vez que recibe de la oficina central las órdenes de carga de producto final para el almacén que tiene *Conservas H* en Zaragoza. Una vez que tiene todos estos datos, la persona encargada de estas actividades decide, basándose únicamente en su experiencia, es decir, sin utilizar ningún tipo de modelo, qué rutas se van a realizar, y qué chóferes y vehículos las van a llevar a cabo. Esta forma de trabajar se puede hacer extensiva a los meses en los que se realiza la campaña del pimiento (septiembre, octubre y noviembre), por lo que los resultados obtenidos permitirán tomar medidas que mejoren las actividades diarias de la empresa en los meses donde la actividad del transporte propio es más intensa.

En la Tabla 3 se detallan las localidades donde *Conservas H* adquirió el espárrago (centros de aprovisionamiento), y las ciudades a las cuales se envió producto final (centros de distribución), a través del transporte propio, durante los meses que duró la campaña del espárrago de 1995. Todas las localidades de la Tabla 3 van a formar el conjunto de nodos que integrarán el programa lineal a desarrollar en la Fase 3.

Por su parte, la Figura 2 nos permite apreciar que las actividades de transporte propio de la empresa abarcan el conjunto de la geografía nacional.

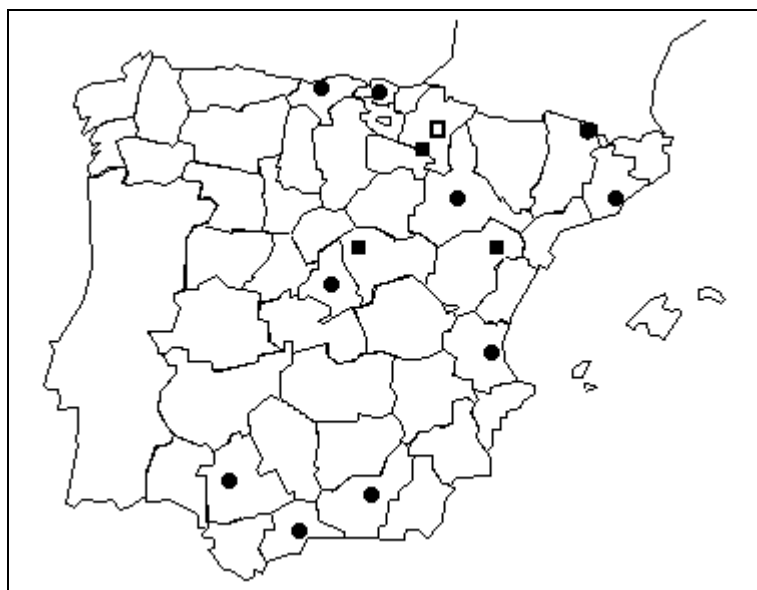
**TABLA 3**  
**CENTROS DE APROVISIONAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE *CONSERVAS H***  
**DURANTE LA CAMPAÑA DEL ESPÁRRAGO DE 1995**

CENTROS DE APROVISIONAMIENTO	CENTROS DE DISTRIBUCIÓN
- <u>Navarra</u> : Arguedas, Cadreita, Cáseda, Buñuel. - <u>Teruel</u> : Valdealgorfa. - <u>Guadalajara</u> : Guadalajara.	Zaragoza, Pamplona, Bilbao, Vitoria, Santander, Barcelona, Valencia, Andorra, Málaga, Granada, Sevilla.

Fuente: Datos cedidos por *Conservas H*.

### 2) Obtención de los costes de transporte propio, en función de los vehículos y chóferes:

Para resolver un problema consistente en la minimización de los costes de transporte diarios, es necesario obtener los costes de transporte de cada viaje entre los distintos nodos implicados, y con cada combinación chófer-camión. Una vez obtenida la matriz de distancias entre los diferentes centros de aprovisionamiento y distribución de la Figura 2, y recabando los datos referentes a los costes asociados con los camiones (consumo de combustible y cuotas de seguro), y chóferes (salarios en horas regulares y extras), se pudieron determinar los costes totales y variables por hora de viaje. De éstos, los costes variables (combustibles más salario extra) son los que realmente hay que tener en cuenta, ya que son los únicos susceptibles de cambio como consecuencia de realizar variaciones en las rutas y en las asignaciones chófer-vehículo.



△ Centros de aprovisionamiento ● Centros de distribución □ Factoría

Figura 2. Centros de aprovisionamiento y distribución de **Conservas H** durante la campaña del espárrago de 1995.

### 3) Programa lineal general [PLG]:

Durante los últimos diez años han proliferado los artículos en los que se desarrollan programas lineales dentro del mundo empresarial, con el fin de optimizar los costes de transporte, y mejorar así, la rentabilidad obtenida por las empresas. El programa aquí planteado, tal como se detalla en la introducción, toma como base los expuestos en Gómez y Salazar (1991), Pooley (1994) y Sankaran y Ubgade (1994). Antes de pasar a describir el programa lineal general, es necesario detallar una serie de supuestos que se han tenido en cuenta al diseñar el programa:

- 1) Salvo casos concretos, todos los vehículos salen de la factoría, y deben llegar a la misma al final del día. Por tanto, la solución final aparece representada como un conjunto de **ciclos**, en que siempre debe aparecer el nodo asociado a la factoría. Dichos ciclos representan las rutas a seguir por las combinaciones chóferes-vehículos asignadas en la solución final.
- 2) La asignación chófer-vehículo debe mantenerse para toda una ruta. Si no se incluyera este supuesto, podría darse un cambio de chóferes en dos vehículos, no estando los dos camiones físicamente en el mismo nodo al mismo tiempo. Realmente, también estamos evitando la posibilidad de que esto se produjese cuando los vehículos se encontrasen a la vez en el mismo nodo. Ahora bien, esta última posibilidad no mejoraría sustancialmente el coste mínimo, y complicaría mucho más el modelo, puesto que habría que tener en cuenta las horas de conducción de los chóferes antes y después del intercambio.
- 3) No se puede transportar de forma conjunta, materia prima y producto final, lo que hace que antes de recoger la materia prima, los vehículos deberán descargar el producto final en los centros de distribución correspondientes.
- 4) No todos los chóferes tienen licencia para conducir todos los vehículos de la empresa, lo que limita las combinaciones factibles chóferes-vehículos.



En el desarrollo del programa lineal general vamos a partir de una situación con  $m$  nodos, los cuales se van a dividir en tres grupos:

- Nodo 1: localidad donde se encuentra ubicada la factoría.
- Nodos 2,...,(s-1): centros de distribución.
- Nodos s,...,m: centros de aprovisionamiento.

Sabiendo que la solución final nos debe determinar las rutas y las asignaciones chófer-vehículo que permitan minimizar los costes de transporte propios de una empresa, las variables, función objetivo y restricciones para un problema general, con  $m$  nodos,  $n$  chóferes y  $z$  vehículos, son las siguientes:

a) Variables de decisión:

$x_{ijk r}$  = número de viajes diarios realizados conjuntamente por el chófer  $k$  y el camión  $r$  desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ , con  $i \neq j$ , donde  $k=1,2,...,n$  y  $r=1,2,...,z$ . Los nodos representan los lugares donde se encuentran los centros de distribución ( $i=2,...,s-1$ ) y aprovisionamiento ( $i=s,...,m$ ). Dentro de estos nodos se encuentra también el asociado a la factoría ( $i=1$ ), el cual se caracteriza porque de él van a salir todos los camiones, y al mismo han de volver al final del día. Para concretar el número de variables debemos tener en cuenta la inclusión de los supuestos (3) y (4), los cuales permiten definir los siguientes conjuntos:

$S=\{(i,j)/ \text{ es factible el viaje entre } i \text{ y } j\}$

$Q=\{(k,r)/ \text{ es factible que el chófer } k \text{ pueda conducir el vehículo } r\}$ .

Por tanto, el total de variables del problema será:  $[cardS * cardQ]$ , donde **cardS** y **cardQ** representan los cardinales de los conjuntos  $S$  y  $Q$ , respectivamente.

b) Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in S} \sum_{(k,r) \in Q} c_{ijk r} x_{ijk r}$$

La función objetivo representa la minimización de los costes de transporte, donde  $c_{ijk r}$  son los costes variables al realizar el chófer  $k$  y el camión  $r$ , el viaje desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ . Los coeficientes  $c_{ijk r}$  se han obtenido en la fase anterior, a partir de los datos obtenidos en la Tabla 2 y en la matriz de distancias de las localidades de la Tabla 3.

c) Restricciones generales:

$$\sum_{j=2}^m \sum_{(k,r) \in Q} v_r x_{1jkr} \geq \text{Max} \left\{ \sum_{j=2}^{s-1} D_j, \sum_{j=s}^m S_j \right\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{s-1} \sum_{(k,r) \in Q} v_r x_{ijk r} \geq D_j \quad j = 2, \dots, (s-1) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{(k,r) \in Q} v_r x_{ijk r} \geq S_j \quad j = s, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in S} \sum_{r=1}^z t_{ijk r} x_{ijk r} \leq T_k \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in S} \sum_{k=1}^n t_{ijk r} x_{ijk r} \leq C_r \quad r = 1, 2, \dots, z \quad (5)$$

$$\sum_{\{i/(i,j) \in S\}} \sum_{\{s/(j,s) \in S\}} (x_{ijk_r} - x_{jskr}) = 0 \quad j = 1, \dots, m, \quad i, s \neq j \quad \forall (k, r) \in Q \quad (6)$$

$$\sum_{j=2}^m x_{1jkr} \geq 1 \quad \forall (k, r) \in Q \quad (7)$$

$$x_{ijk_r} \geq 0 \text{ enteras} \quad (8)$$

La justificación al uso de estas restricciones es la siguiente:

(1): restricción relacionada con el nodo asociado a la factoría ( $i=1$ ): del mismo deben salir camiones cuya capacidad ( $v_r$ ) sea igual o superior al valor máximo de los dos valores siguientes: oferta global y demanda global. Esto se debe a que todos los camiones deben salir de la factoría cargados con el total del producto final demandado, y regresar a la misma con el total de materia prima (espárrago, en este caso) recogida en los centros de aprovisionamiento (primer supuesto).

(2) y (3): la suma de la capacidad de cada uno de los camiones ( $v_r$ ) que llegan a cada nodo, debe ser mayor o igual que las cantidades demandadas de producto final,  $D_j$ , u ofertadas de materia prima,  $S_j$ , en dichos nodos. En el caso de que un vehículo venga de recoger materia prima de otra localidad, se deberá restar a  $v_r$  los kilogramos recogidos en dicho nodo.

(4): el tiempo total que cada chófer puede estar conduciendo cada día debe ser menor que  $T_k$ , donde los coeficientes  $t_{ijk_r}$  representan el tiempo en horas que cuesta al camión  $r$  y al chófer  $k$  realizar un viaje desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ , más el tiempo de carga/descarga. La obtención de los coeficientes  $t_{ijk_r}$  se realizó a través del cálculo de la matriz de distancias entre cada una de las localidades de la Figura 2 y de los datos asociados a los vehículos, que nos facilitaron la velocidad media y los tiempos de carga y descarga de cada uno de ellos (Tabla 2). Para la obtención de  $T_k$  se determinó previamente cuál es el viaje de mayor duración que puede realizar un chófer durante ese día. Así,  $T_k$  tomará el valor de la duración de dicho viaje, incluyendo los tiempos de carga y descarga en cada nodo.

(5): el tiempo total que cada camión puede estar circulando cada día debe ser menor que  $C_r$ , que representa la duración del viaje o combinaciones de viajes que, como máximo, puede realizar cada camión en un día. Esta cota será diferente, en función de los nodos presentes en cada problema, del mismo modo que ocurriría con las restricciones (3). La razón de incluir las restricciones (3) y (4), y no sólo una de ellas, se debe a que, a priori, no se sabe cuáles son las asignaciones chóferes-vehículos óptimas. Si éstas vinieran dadas, es decir, que cada vehículo pudiera ser conducido por un único chófer (ej.: transportistas autónomos), sólo sería necesario incluir la restricción temporal más limitativa.

(6): estas restricciones tienen una doble función. Por un lado, evitan cambios no permitidos chófer-vehículo a lo largo de cada ruta (segundo supuesto), y por otro lado, aseguran que cada ruta está formada por un ciclo (primer supuesto), en cuanto que toda asignación chófer-vehículo que entre en un nodo, debe salir del mismo.

(7): con estas restricciones, nos aseguramos que el nodo asociado a la factoría ( $i=1$ ), forma parte de todos los ciclos; es decir, que todo chófer-vehículo que reparta producto final y/o recoja materia prima, debe salir de la factoría. A su vez, a través de (6), nos aseguramos que volverán al mismo, cumpliéndose así, el primer supuesto.

(8): las variables  $x_{ijk_r}$  deben tomar valores enteros, puesto que representan número de viajes.

Se hace necesario indicar respecto a la eficiencia del algoritmo empleado, que unos valores grandes de  $m$ ,  $n$  ó  $z$  pueden conseguir que la dimensión del programa lineal asociado

crezca desmesuradamente. También, la condición de integridad de las variables complica la resolución del programa lineal.

***La principal ventaja de este programa es que permite tener un modelo general aplicable, no sólo para Conservas H, sino para todas aquellas empresas cuyas actividades de aprovisionamiento y de distribución se realicen con transporte propio.*** Por su parte, las características propias de cada empresa hacen que este modelo deba ser modificado, tanto en las variables como en las restricciones, para que pueda ser utilizado para optimizar los costes de transporte. Las variantes añadidas en el caso de **Conservas H** se explican en el siguiente epígrafe.

#### **4) Aplicación práctica del programa lineal al caso de Conservas H:**

Hay que recordar que el objeto final de este estudio no es aportar a la empresa un programa lineal que pueda implementar cada día para optimizar sus costes de transporte, sino unas pautas de comportamiento para mejorar la gestión de sus actividades de transporte. Esto se debe a que **Conservas H** no posee ni el material informático ni los conocimientos adecuados para utilizar de forma regular el programa lineal descrito en la fase anterior. Por esto, el objetivo de esta fase no es sólo comparar los resultados obtenidos por la empresa y por el modelo, sino facilitar a **Conservas H** unas normas generales de diseño de rutas y asignación chóferes-vehículos.

Para llevar a cabo este objetivo, se analizaron los 62 días en los que se utilizó transporte propio durante la campaña del espárrago de 1995, con el fin de determinar los factores que daban lugar a cambios en la solución final. Al hacer esto, se comprobó que la solución final variaba en función de tres factores:

- Localidades (nodos) integrantes del problema (ver Tabla 3).
- Número de kilos de materia prima a recoger en cada centro de aprovisionamiento.
- Volumen de producto final a enviar a cada cliente.

Una vez analizados los 62 días, se observó que, en función de las localidades que forman parte del problema, se podían crear cinco grupos estándar, cuya solución variaba según los kilos demandados de producto final u ofertados de materia prima de cada uno de los nodos integrantes del problema. Los nodos que integraban cada uno de los grupos fueron los siguientes:

- Grupo 1: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel y Cáseda (7 días).
- Grupo 2: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda y Valdeatorfa (27 días).
- Grupo 3: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda, Valdeatorfa y Guadalajara (12 días).
- Grupo 4: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda, Valdeatorfa y una de las siguientes ciudades: Bilbao, Pamplona, Vitoria o Santander (4 días).
- Grupo 5: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda, Valdeatorfa y una ciudad en la que el chófer tuvo que pernoctar (Valencia, Granada, Málaga, Sevilla o Andorra) (12 días).

El procedimiento de ejecución del modelo [PLG] ha sido modificado parcialmente en cada uno de los grupos, en cuanto que las restricciones anteriormente planteadas han sido complementadas o corregidas en casos concretos de distribución de mercancías, a través de otras restricciones que era necesario tener en cuenta, tales como pernocta de chóferes (ej.: Grupo 5), existencia de ventanas de tiempo,... Estas restricciones, al no tener carácter general, no aparecen en [PLG], pero han sido tenidas en cuenta en la resolución de los programas lineales asociados a cada uno de los grupos.

Por todo esto, se decidió realizar unos **cuadros estándar** que permitieran la obtención instantánea de la solución final. Con este fin, se realizaron programas estándar para resolver los

problemas pertenecientes a los cinco grupos. Las características de los cinco programas estándar se muestran en la Tabla 4.

**TABLA 4**  
**DIMENSIONES DE LOS PROGRAMAS LINEALES DE CADA GRUPO**

<b>Grupos</b>	<b>Variables</b>	<b>Restricciones</b>
Grupo 1	76	32
Grupo 2	126	80
Grupo 3	156	90
Grupo 4	150	85
Grupo 5	150	85

Fuente: Elaboración propia.

El programa utilizado para resolver cada uno de los grupos fue el SuperLINDO. La optimización de estos programas permitió obtener la solución de cada uno de los días estándar para los distintos intervalos de demanda y oferta de cada uno de los nodos incluidos en los diferentes problemas. Estas soluciones pudieron compararse con las combinaciones realizadas por la empresa durante el año 1995.

### **RESULTADOS OBTENIDOS**

En las conversaciones mantenidas con el director de logística de la empresa se destacó la necesidad de que este trabajo facilitara la toma de decisiones, no sólo en lo que respecta a los costes, sino en la posibilidad de realizar la elección de rutas de la forma más rápida posible. Con este fin, y tomando como base los días estándar descritos en apartados anteriores, se llegó a la conclusión de que lo más adecuado era la realización de unas tablas en las que, en función del grupo y de las cantidades demandadas en cada nodo, se supiera de forma inmediata, la ruta y combinación chóferes-camiones óptimas.

La resolución de los diferentes grupos estándar permitió comparar las rutas y combinaciones chóferes-camiones elegidas por la empresa a lo largo de la campaña del espárrago de 1995, con las rutas y combinaciones consideradas óptimas por el modelo de programación lineal implementado. Los resultados, detallados por grupos, se encuentran en la Tabla 5. De dichos datos, se puede observar cómo el ahorro porcentual que la empresa hubiera obtenido en el caso de implementar la solución del modelo, habría ascendido a cerca del 10%.

Para analizar la reducción de costes de transporte alcanzada, es preciso tener en cuenta que esta reducción afecta sólo al ámbito temporal de la campaña de espárrago, y abarca, por tanto, su período de recogida, es decir, tres meses. La aplicación del modelo para un mayor número de materias primas y mayor horizonte temporal podría generar mayores reducciones de costes.

De los resultados obtenidos, se pueden extraer algunas sugerencias vinculadas a lograr una mejora en la eficiencia de la gestión del transporte propio de la compañía.

**TABLA 5**  
**REDUCCIÓN DE COSTES TOTAL Y POR GRUPOS**

Grupos	1	2	3	4	5	Total
Reducción % de costes	31 %	12,55 %	8 %	9,2 %	1 %	10 %

Fuente: Elaboración propia. Los datos totales se han obviado para preservar el deseo de privacidad de la empresa.

En primer lugar, debemos mencionar que un número significativo de rutas proporcionadas por el modelo hubieron de ser descartadas debido a las restricciones horarias existentes en los puntos de recogida del espárrago (ventanas de tiempo). La empresa debería considerar la conveniencia de modificar estos horarios en función del posible ahorro de costes de abastecimiento y almacenamiento que se podrían conseguir frente al posible coste de ampliar los horarios de recogida.

En segundo lugar, y a la vista de los datos obtenidos tras la aplicación del modelo propuesto sobre la explotación de los vehículos propios (véase Tabla 6), la empresa debería considerar la no utilización de los vehículos 4 y 5. De hecho, con tres camiones de capacidad alta, media y baja, podría realizar las mismas actividades que viene desarrollando en la actualidad, aún cuando, en situaciones puntuales tendría que recurrir a transportistas autónomos; esta medida no afectaría significativamente a los costes variables, mientras que sí tendría un efecto positivo sobre los costes fijos.

Pasando a cuestiones más generales, la realización de este trabajo ha permitido vislumbrar posibles líneas de investigación, que podrían ser desarrolladas en futuros trabajos. Estas líneas van en dos direcciones. Por un lado, en el perfeccionamiento del trabajo de aplicación y, por otro, en la posible implementación del modelo en otros sectores y empresas, y en la creación de variantes del mismo.

**TABLA 6**  
**DATOS SOBRE LA UTILIZACIÓN DE LOS VEHÍCULOS PROPIOS**

	Vehículo 1	Vehículo 2	Vehículo 3	Vehículo 4	Vehículo 5
Nº días utilizados	45	56	44	26	5
% Utilización	72 %	90 %	71,5 %	42 %	8 %

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al primer ámbito de desarrollo, no hay que olvidar que la principal ventaja de la programación lineal es que permite realizar análisis de sensibilidad y paramétrico: cambiar los valores de los coeficientes de las variables, tanto en la función objetivo como en las restricciones, con el fin de comprobar cómo varía la solución final. En el caso que nos ocupa, sería de utilidad ver los efectos en el coste del transporte, de hechos tales como la inclusión/exclusión de nuevos chóferes y camiones, la variación del coste en determinadas conexiones, la fluctuación en los salarios, la eliminación de conexiones o cambios en el precio del combustible.

Por otra parte, un trabajo inmediato será el analizar los efectos de la aplicación del modelo propuesto, en la medida en que puede afectar al ritmo productivo, sobre el sistema de distribución, con el fin de estudiar cómo difieren los resultados económicos existentes de los que podrían obtenerse mediante el empleo de la solución propuesta. Éste sería el próximo paso a

emprender y su resolución puede constituir un punto de partida para estudios más amplios que abarquen la logística empresarial en su conjunto.

## CONCLUSIONES

El objetivo que se ha buscado en este trabajo, ya citado en la introducción, ha sido demostrar la utilidad de la aplicación de los modelos de la programación lineal en el ámbito de la logística empresarial como elemento básico de apoyo en el proceso de toma de decisiones.

Sin embargo, a lo largo del trabajo se ha puesto también de manifiesto, la necesidad del empleo de modelos matemáticos en el proceso de caracterización de los factores relevantes que definen una unidad empresarial, y su modo de actuar.

En el caso de la empresa, los resultados del trabajo ponen de manifiesto las siguientes cuestiones:

1) La implantación del modelo brindó la posibilidad de conocer en qué medida, las prácticas imperantes se acercaban o distanciaban de un óptimo teórico.

2) El desarrollo del modelo sacó a la luz numerosas interrogantes sobre la relevancia de las políticas de gestión existentes.

3) La capacidad de predicción del modelo puede convertirse en un elemento estratégico de apoyo al proceso de toma de decisiones, dado que su utilización puede conducir a cambios importantes en la fijación de nuevas prioridades competitivas y la reorganización de su proceso productivo.

Respecto a la aplicabilidad de este modelo, hay que resaltar la utilidad que puede tener, no sólo en el sector conservero, sino en todas aquellas empresas que trabajen con vehículos propios y deban determinar las rutas de los mismos. Así, se puede concluir la importancia de la programación lineal en el sector conservero, sobre todo en cuestiones de transporte propio, donde las empresas deben gestionar las rutas y las asignaciones chóferes-vehículos de forma diaria. Las características del sector hacen que el transporte propio tenga especial importancia en el aprovisionamiento de la materia prima, siendo en este campo donde la utilización de la programación lineal puede ser más útil para las empresas.

Por último, la implementación del modelo aplicado en este trabajo puede provocar un cambio de filosofía a la hora de enfocar la toma de decisiones. Hasta ahora, la mayor parte de las decisiones en la empresa estudiada han sido tomadas únicamente en función de la experiencia, lo cual no significa que dichas decisiones no sean correctas. Lo que se desea enfatizar es que la aplicación de modelos permite tener en cuenta muchas variables y factores, que hasta este momento, la empresa no se había planteado, al menos de forma conjunta.

## SUMMARY

The aim of this study is to show how an application of linear programming can be usefully employed in the overall management of logistical activities in business. To this end, a model of linear programming optimizing transport costs was developed and applied to a business dealing in canned goods. The final results not only reduced but also led to a greater understanding of the factors that influence decision making. The advantage of this model is its flexibility, as it can be applied, in a general form, to any firm which aims to optimize the costs of its own transport system and efficiently employ both drivers and vehicles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLOU, R.H., 1991. *Logística empresarial*. Díaz de Santos, Madrid, 437pp.
- CALLEJA, J.C., 1995. *Informática en el transporte*. Transporte Profesional. Junio, pp.47-70.
- DANTZIG, G., 1963. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, Princeton, 631pp.
- DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y MONTES DE NAVARRA, 1993. *Anuario de Industrias Agroalimentarias de Navarra*. Diputación Foral de Navarra, Serie agraria, n.17.
- DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y MONTES DE NAVARRA, 1994a. *Manual de Estadística agraria. Navarra y comarcas (1987-92)*. Diputación Foral de Navarra, Serie agraria, n.19, 347pp.
- DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y MONTES DE NAVARRA, 1994b. *Anuario de Industrias Agroalimentarias de Navarra*. Diputación Foral de Navarra, Serie agraria, n.31, 349pp.
- EVANS, J.R., 1984. *The Factored Transportation Problem*. Management Science, vol.30, n.8, pp.1021-1024.
- FAWCETT, P., MCLEISH, R. Y OGDEN, I., 1992. *Logistics Management*. Longman Group, London, 297pp.
- GÓMEZ, A.C., SALAZAR, A., 1991. *Volúmenes óptimos de transporte y transformación en el sector remolachero-azucarero español*. Investigación agraria: economía. vol.6, n.1, pp.95-107.
- HITCHCOCK, F.L., 1941. *The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities*. Journal of Mathematics and Physics, vol.20, pp.224-230.
- POOLEY, J., 1994. *Integrated Production and Distribution Facility Planning at Ault Foods*. Interfaces, vol.24, n.4, pp.113-121.
- SANKARAN, J.K., UBGADE, R.R., 1994. *Routing Tankers for Dairy Milk Pickup*. Interfaces, vol.24, n.5, pp.59-66.
- SCHORR, J., ALEXANDER, M., FRANCO, R.J., 1969 *Logistics in Marketing*. Pitman Publishing Corporation, Nueva York, 403pp.
- SCHRAGE, L., 1991. LINDO. *An Optimization Modeling System*. ITP, Danvers, 570pp.
- SZWARC, W., 1975. *Instant Transportation Solutions*. Naval Research Logistics Quaterly, vol.22, pp.727-729.
- WEST, A., 1991. *Gestión de la distribución comercial*. Díaz de Santos, Madrid, 337pp.