

Documento de Trabajo 97-12
Serie de Economía de la Empresa 06
Octubre 1997

Departamento de Economía de la Empresa
Universidad Carlos III de Madrid
Calle Madrid, 126
28903 Getafe (Spain)
Fax (341) 624-9608

DISEÑO DE ESTRATEGIAS LOGÍSTICAS MEDIANTE LOS MODELOS DE TRANSPORTE:
UNA APLICACIÓN A LA INDUSTRIA CONSERVERA NAVARRA*

M^aJ. Álvarez Gil, F.J. Fajardo y J.A. Alfaro Tanco**

Resumen

La integración de las actividades logísticas como un factor básico en la mejora de la competitividad de las empresas, es una realidad dentro de los sectores industriales modernos. La literatura ofrece algunos ejemplos de los procesos seguidos para lograr esta integración en empresas de tamaño medio o grande; sin embargo, puede decirse que existe un vacío en lo que respecta al contraste empírico de las prácticas de integración logística seguidas por las pequeñas empresas.

Este trabajo explora los potenciales beneficios inmediatos que tales entidades podrían obtener si optasen por la aplicación de modelos de optimización, tendentes a sistematizar el proceso de toma de decisiones logísticas integradas, así como a encontrar una estrategia logística superior, caracterizada por una mayor eficacia en la asignación y el consumo de los recursos. A tal efecto, se ha diseñado un modelo de transporte susceptible de ser empleado, con éxito, por la industria conservera.

Palabras Clave: Logística empresarial, cadena industrial (*supply chain*), modelos de transporte, Navarra (España), industria conservera.

* La Profesora Álvarez ha disfrutado de financiación parcial para la realización de este trabajo procedente del proyecto PB94-0372 de la DGICYT y de una beca para estancia de investigadores españoles en centros de investigación extranjeros, de referencia PR95-583, de la DGES. Los Profesores Faulín y Alfaro han disfrutado de una ayuda para la realización de este trabajo procedente de la Fundación Empresa-Universidad de Navarra.

** Álvarez, M^aJ. Departamento de Economía de la Empresa de la Universidad Carlos III de Madrid. Faulín, J. y Alfaro, J.A. Departamento de Economía y Estadística de la Universidad de Navarra.



INTRODUCCIÓN

A lo largo de la presente década se ha podido observar que las empresas que están obteniendo mayores éxitos competitivos presentan, entre otros rasgos comunes, el de la integración de la estrategia logística en el ámbito de la estrategia corporativa. El enfoque convencional asumía que la gestión independiente de la logística interna y externa podría ayudar a disponer de mayor flexibilidad. Sin embargo, la globalización, los costes de los combustibles, las tecnologías avanzadas y la reducción en el tamaño de las empresas, entre otros fenómenos, han conducido a que los departamentos encargados de la gestión y del control de costes planteen nuevos retos a los responsables de la logística empresarial.

La utilización de un grupo central que gestione todos los envíos y distribución, y que establezca estándares operativos uniformes para toda la organización, permite a las empresas ser más flexibles gracias a una coordinación más estrecha de los recursos físicos, financieros y de información. Las organizaciones necesitan construir una red logística troncal, radicada preferentemente en la sede principal, desde la que se facilite la orquestación y dirección del entramado cada vez más amplio constituido por las relaciones externas que son necesarias en las cadenas globales de aprovisionamiento y distribución (Rheem, 1997).

Este comportamiento empresarial puede explicarse con el concurso del concepto teórico de la *cadena industrial (supply chain)*. Ganeshan y Harrison (1995) la definen como una red de instalaciones y opciones de distribución que desarrollan las funciones de aprovisionamiento de materiales, su transformación de estos materiales en productos intermedios y terminados y la distribución de estos últimos a los clientes. La cadena incluye una red de instalaciones físicas, la tecnología y los procesos para transformar la materia prima en productos terminados y un método para trasladar los materiales que se extiende desde el aprovisionamiento de las materias primas hasta el consumidor final. Según el Diccionario APICS (Cox, et al, 1995), la *cadena industrial*

comprende aquellas funciones que, dentro y fuera de la empresa permiten a la cadena de valor elaborar productos y servicios para el cliente, y Turner (1993) señala que la consideración integral de la *cadena industrial* puede permitir a la empresa establecer un plan consistente para ajustar necesidades y disponibilidades de oferta y demanda.

Hoy en día, después de una década en la que las empresas han dedicado todo su empeño a mejorar su entorno operativo, aquellas compañías que ya han conseguido una relativa paridad entre las áreas de costes y calidad, están buscando alternativas para encontrar la forma de desarrollar una ventaja diferencial en variables competitivas tales como fiabilidad y rapidez de las entregas, flexibilidad e innovación, cada una de las cuales enfatiza la importancia de la variable competitiva tiempo. Muchos de estos esfuerzos inspirados en la reducción del tiempo se apoyan en la idea de que una gestión integrada de la cadena industrial puede proporcionar una ventaja competitiva diferenciadora.

Este cambio de orientación ha planteado nuevos intereses y líneas de investigación en la gestión de la logística empresarial (agregadas dentro del marco conceptual denominado *neologística*). Aunque esta nueva avenida de investigación está generando una abundante literatura, queda todavía por cubrir el hueco de las investigaciones orientadas a la contrastación, sea ésta de índole teórica o empírica, de la difusión de los comentados nuevos enfoques entre las empresas de pequeño tamaño. Así, no existen estudios empíricos, con la excepción del artículo de Scully y Fawcett (1994), de cuyos resultados se pueda deducir si estas organizaciones han logrado, o no, integrar sus procesos logísticos, qué tipos de procesos utilizan, cuál es la extensión de su cadena industrial, su nivel de eficiencia, etc.

En este trabajo nos planteamos conocer la eficacia y la eficiencia de las decisiones de las pequeñas empresas en lo que se refiere a la selección de las rutas de aprovisionamiento y distribución mediante la opción del transporte propio. Como instrumento facilitador de la medición

hemos empleado un modelo de transporte que se inspira, en lo esencial, en las versiones clásicas más conocidas. La sistematización necesaria para llevar a cabo el diseño del modelo ha permitido detectar áreas empresariales y conjuntos de decisiones que son susceptibles de ser modelizados, sacando a la luz cuestiones que no habían sido identificadas con anterioridad al desarrollo de este trabajo. El conjunto de sugerencias que se ofrece a la dirección de las entidades, tanto aquéllas de carácter puntual, como las relacionadas con la programación a muy corto de las operaciones logísticas, sitúan a nuestro modelo en una línea similar, aunque no idéntica, a la de los trabajos más recientes de Gómez y Salazar (1991), Pooley (1994), o Sankaran y Ubgade (1994).

Nuestro artículo se ha organizado de la siguiente manera: en primer lugar describimos el sector industrial elegido para el análisis, así como la empresa concreta para la que se ha desarrollado el modelo de transporte y su *modus operandi*. A continuación se describe en detalle el caso a modelizar, deteniéndonos en el programa lineal general y en su aplicación práctica a la empresa analizada. Para finalizar se presentan los resultados obtenidos, se plantean sugerencias para la dirección logística de la empresa y se apuntan líneas futuras de investigación.

ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TRABAJO

La elección del sector conservero de Navarra como campo de aplicación práctica se decidió en función de varias razones. La más importante hace referencia a las especiales características de este sector en el ámbito del aprovisionamiento y la distribución, que proporcionan al transporte una función relevante en la coordinación de las actividades que forman parte de la cadena industrial. Estos factores especiales tienen su origen en las materias primas básicas de este sector: verduras y, en menor medida, frutas. Ambos productos se caracterizan por su *alto grado de perecederibilidad* y por *un período de recogida de materia prima muy reducido* (dos a tres meses). Esto provoca que las empresas tengan que ajustar los procesos productivos a cada una de las campañas de

recolección. De este modo, las empresas disponen únicamente de un horizonte de fabricación de dos a tres meses para elaborar cada uno de sus productos, mientras que la distribución de éstos tiene un carácter anual. Por tanto, aunque *los procesos de producción son intensivos en el tiempo*, la empresa se ve obligada a mantener unos *niveles muy elevados de inventario de producto final*. En este entorno, *la función más importante del transporte debe ir encaminada a conseguir que la oferta y la demanda de materia prima diaria para la fabricación se ajusten en la mayor medida posible*. De este modo, esta función se convierte en el eje central del sistema de planificación, programación y control de la producción. Efectivamente, mientras que, por un lado, se evitará la existencia de un excesivo inventario de materia prima, que repercute en la calidad del producto final, por otro se reducirá la probabilidad de incurrir en situaciones de ruptura de inventario que puedan impedir el cumplimiento del programa de producción. Tanto la planificación de las necesidades de materiales (MRP), como la programación de las actividades productivas van a estar condicionadas por el rendimiento del sistema de aprovisionamiento. Por tanto, se puede afirmar que *la necesidad de integración del transporte dentro de la cadena industrial de las empresas conserveras es máxima*.

La segunda razón para elegir este sector fue la dimensión media de la mayoría de las empresas que lo integran (en 1995, el número medio de empleados era de 57); el pequeño tamaño de estas firmas ha dificultado la difusión de aplicaciones de modelos como el que aquí se presenta y, por tanto, la sistematización y racionalización del proceso de toma de decisiones logísticas.

Respecto al ámbito geográfico, se decidió analizar el sector en la Comunidad Foral de Navarra, debido a que se trata de una industria característica de la economía de esta región; en la Tabla 1 se puede observar la relevancia 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 nivel nacional. A partir de estos datos, se comprueba la mayor importancia relativa que tiene el sector conservero en Navarra en relación con el territorio nacional. Así, toda mejora producida en este sector tendrá consecuencias positivas, no sólo para él mismo, sino para la economía foral en su conjunto.

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.)

La consulta de bibliografía publicada por el Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes de la Diputación Foral de Navarra (1993, 1994a, 1994b), junto a las entrevistas mantenidas 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, 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:

A fin de seleccionar una empresa desde la que pudiéramos 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, la representatividad dentro del sector conservero y la accesibilidad a los datos actualizados y fiables necesarios para realizar un trabajo serio y completo. La empresa que resultó seleccionada será denominada *Conservas H*, dado el deseo mostrado por ésta de preservar la privacidad de sus datos.

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 consiguiente abaratamiento de los costes de transporte. Dentro de los productos elaborados y comercializados, los más importantes son, por un lado, las conservas de espárragos y pimientos y, por otro, los 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 y que muestra, a su vez, el alto grado de intensidad de los procesos productivos durante las campañas de recolección de las materias primas básicas para cada empresa. Hay que destacar, por último, la existencia de amplios y numerosos espacios para almacenamiento.

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 los 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 (c) y (d) de la Figura 1]. A partir de ese momento, son las agencias de transporte las que se encargan de trasladar la mercancía a los clientes [enlaces (e) y (f) de la Figura 1].

Dentro de las actividades a las que se dedica el transporte propio, las más importantes son, como se ha dicho anteriormente, el transporte de aprovisionamiento de materias primas, sobre todo, espárrago y pimiento y, por otro lado, el transporte diario de producto final al almacén de Zaragoza y a los de las agencias de transporte. Dentro de la Figura 1, estas actividades se relacionan con los enlaces (a), (c) y (d). De forma no diaria, pero sí regular, *Conservas H* también utiliza el transporte propio para enviar producto final directamente a los clientes [enlace (b) de la Figura 1]. Una vez que los vehículos propios han descargado el producto final, bien sea en el almacén de Zaragoza, en el de los clientes o en de las agencias de transporte, existen dos opciones: que vuelvan directamente a la factoría (enlaces (b), (c) y (d)), o bien que se dirijan a uno o varios centros de aprovisionamiento a cargar materia prima (enlaces (g), (h) ó (i)), y de ahí, volver a la factoría (enlace (a)).

Así, las rutas que pueden hacer los vehículos propios en *Conservas H* son de tres tipos:

- Tipo 1: salen con producto final y vuelven de vacío.
- Tipo 2: salen de vacío y vuelven con materia prima.
- Tipo 3: salen con producto final y vuelven con materia prima.

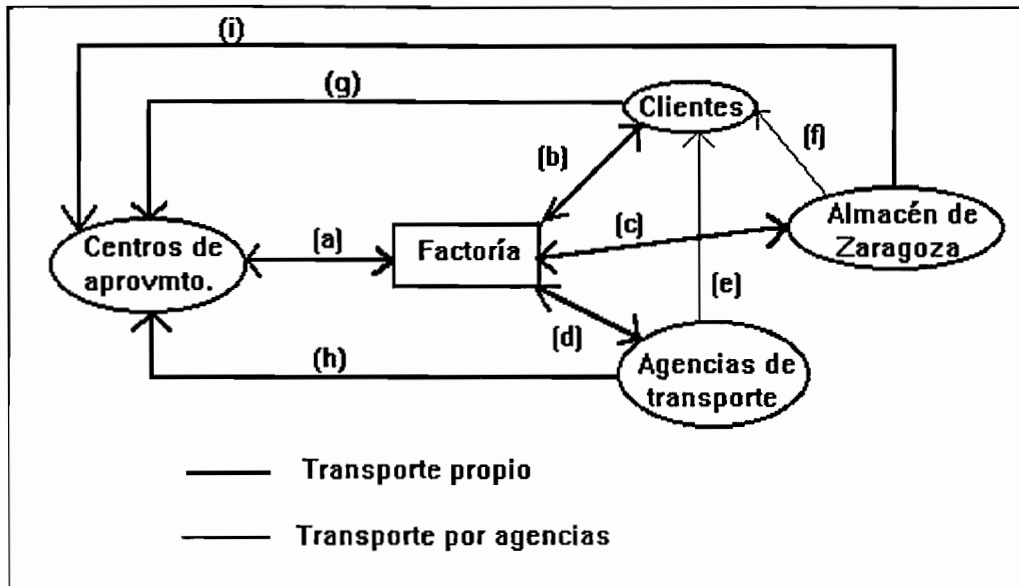


Figura 1. Descripción del transporte en *Conservas H.*

La compañía dispone de *cinco vehículos*: cuatro camiones y una camioneta. Las características técnicas de los mismos, y que más tarde servirán para determinar los costes de transporte, se muestran en la Tabla 2. Además, la empresa tiene contratados a *tres chóferes*, que se dedican a la conducción de los vehículos y al trabajo en la fábrica. El régimen salarial de los mismos es diferente: mientras que dos de ellos tienen un salario base sobre una jornada laboral de ocho horas al día, más las horas extras, el tercer chófer cobra una cantidad fija, independientemente del número de horas que trabaje. Este dato es importante, en cuanto que los costes de los viajes realizados no sólo dependen de las características técnicas del vehículo utilizado (influyen en el gasto de combustible y en el tiempo invertido en los viajes), sino del chófer elegido. Además, de estos tres chóferes, uno de ellos sólo tiene licencia para conducir los vehículos 2, 3 y 5. De este modo, una de las decisiones a tomar por la empresa al gestionar los viajes diarios del transporte propio será el determinar qué chóferes conducen cada uno de los vehículos.

TABLA 2

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS VEHÍCULOS QUE SON PROPIEDAD DE LA EMPRESA

VEHÍCULO	CAPACIDAD (kg.)	TIPO	CONSUMO (Lts./100 km.)	TIEMPO DE TRANSPORTE (km./hora)	TIEMPO DE CARGA/DES- CARGA (horas.)
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.*

Si bien la empresa dispone de una amplia experiencia previa, desde la cual realiza sus estimaciones globales sobre cuáles van a ser los volúmenes de materias primas y productos terminados a transportar a lo largo del año, ésta no emplea un proceso sistemático de recogida de información, ni trabaja desde un plan y un programa de producción. Dada la buena comunicación existente con los proveedores y los clientes y la importancia de la entrega a tiempo de productos fiables, la empresa está siguiendo, para el caso del transporte propio, lo que en términos técnicos podríamos caracterizar como un enfoque dominado por la programación a muy corto plazo y que el gerente de la empresa define como el *día a día*, esto es, las rutas se deciden al principio de la jornada. Esta política es habitual dentro del sector: por un lado, la dimensión empresarial no permite trabajar con grandes lotes de productos y, por otro, 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.

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 un estudio que reuniese las siguientes características: *análisis detallado y sistemático de los procesos logísticos existentes en la empresa como primer paso para el posterior diseño de un programa lineal que permita la mejora de la competitividad a través de la integración de las actividades diarias de transporte vinculadas a la cadena industrial de la empresa*. Con este fin se desarrolló un programa lineal para minimizar 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 hemos utilizado los datos reales referentes a los viajes realizados por los vehículos propios de la empresa durante la *campana del espárrago de 1995*. Este ámbito temporal representa el periodo de tiempo, junto a la campaña del pimiento, en el que la actividad del transporte propio es más intensa dentro de *Conservas H* y, por tanto, en el que mejor 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 y recogida de datos sobre los costes del transporte propio, en función de los vehículos y chóferes de la empresa.

Fase 2) Modelización del programa lineal.

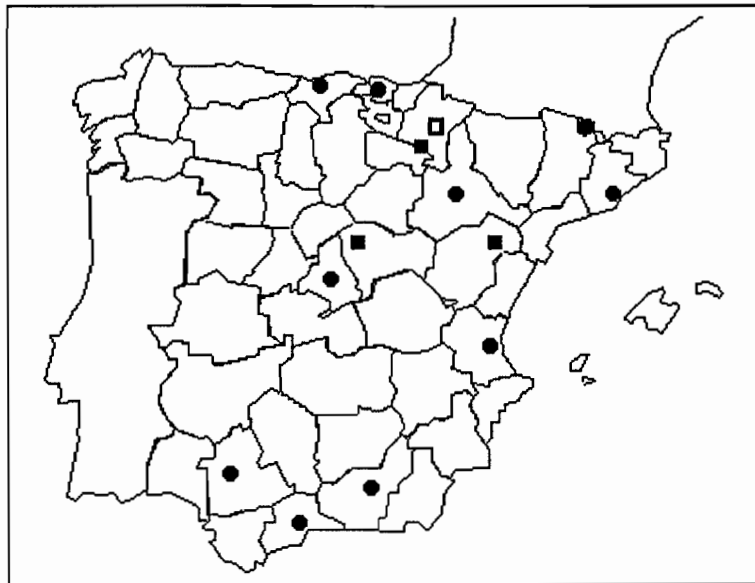
Fase 3) Aplicación del programa lineal en *Conservas H*.

1) Descripción de la gestión diaria del transporte propio de *Conservas H* durante la campaña del espárrago y recogida de datos sobre los costes de transporte propio, en función de los vehículos y chóferes de la empresa.

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.

El conjunto de 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 se muestran en la Figura 2 y en la Tabla 3. Estas localidades, junto a la población donde se ubica *Conservas H*, van a formar el conjunto de nodos que integrarán el programa lineal a desarrollar en la Fase 2.



■ Centros de aprovisionamiento ● Centros de distribución □ Factoría

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

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> : Valdealgofa. - <u>Guadalajara</u> : Guadalajara.	Zaragoza, Pamplona, Bilbao, Vitoria, Santander, Barcelona, Valencia, Andorra, Málaga, Granada, Sevilla.

Fuente: Datos cedidos por Conservas H.

La resolución de un problema que persigue la minimización de los costes de transporte diarios exige la obtención de los costes de transporte de cada viaje entre los distintos nodos implicados, así como los asociados a cada combinación chófer-camión. Una vez obtenida la matriz de distancias entre los diferentes centros de aprovisionamiento y distribución de la Figura 2, y empleando los datos de costes de los camiones (consumo de combustible y cuotas de seguro), y chóferes (salarios en horas regulares y extras) proporcionados por la empresa, se estimaron los costes totales y variables por hora de viaje. De éstos, los costes variables (combustibles más salario

extra) son los que hemos considerado, puesto que son los únicos susceptibles de cambio como consecuencia de realizar variaciones en las rutas y en las asignaciones chófer-vehículo.

2) Modelización del programa lineal general [PLG]:

El planteamiento original del PLG toma como base el modelo del transporte desarrollado por Hitchcock (1941) y Dantzig (1963). Esto no supone, sin embargo, 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. Queremos decir con esto que nuestro trabajo parte del mismo punto que los modelos de transporte: la optimización de los costes de transporte sujeta a un conjunto de restricciones de oferta y demanda; sin embargo, la peculiaridad de la situación a analizar obliga a incluir restricciones adicionales, similares de algún modo a las que aparecen en los modelos propuestos por Gómez y Salazar (1991), Pooley (1994) y Sankaran y Ubgade (1994). Nuestro modelo, no obstante, difiere de los reseñados en, al menos, dos cuestiones: en primer lugar, *el ámbito de aplicación*; los dos últimos trabajos se centran en empresas lácteas de gran tamaño, con un sistema logístico bien desarrollado, mientras que nuestra empresa de referencia es una entidad de dimensión media y sistemas de transporte propio y ajeno. Por otra parte, Gómez y Salazar (1991) aplican su modelo, no en una empresa individual, sino en un sector industrial, cual es el de la producción azucarera, sometido a restricciones diferentes al de las conservas alimenticias, entre las que cabe citar la necesidad de una dimensión productiva mínima muy superior a la de las empresas conserveras navarras. Estos factores repercuten en la aplicabilidad del programa lineal, en cuanto que las empresas grandes disponen de los medios y conocimientos suficientes para implementar dichos programas. Por esta razón, a diferencia de los artículos que nos han servido de referencia, nuestro modelo no se limita a proporcionar información para comparar los resultados óptimos

frente a los reales, sino que proporciona a la empresa unas pautas de comportamiento, lo cual supone un paso hacia adelante en la aplicabilidad de este tipo de modelos. Además, el modelo que se propone permite mejorar la eficiencia en la *gestión diaria de las actividades*. Mientras que Pooley (1994) y Sankaran y Ubgade (1994) recogen sugerencias en torno a las decisiones de carácter estructural relacionadas con la localización de plantas, y Gómez y Salazar (1991) plantean recomendaciones para el sector en su conjunto, en este trabajo se incluyen implicaciones para la gestión de tipo estructural y operativo. 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) Todos los vehículos salen de la factoría, y deben llegar a la misma al final del viaje. 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 substancialmente 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.
- 5) La duración de los viajes no tiene porqué ser de carácter diario: es posible que los chóferes se vean obligados a pernoctar, y reiniciar la ruta el día siguiente.

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 determinará las rutas y las asignaciones chófer-vehículo que permitan minimizar los costes de transporte propio 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 $k=1,2,\dots,n$ y $r=1,2,\dots,z$.

Los nodos representan los lugares donde se encuentran los centros de distribución ($i=2,\dots,s-1$) y aprovisionamiento ($i=s,\dots,m$). Dentro de estos nodos se encuentra también el asociado a la fábrica ($i=1$), el cual se caracteriza porque de él van a salir todos los camiones, y al mismo han de volver al final de cada viaje.

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: $[\text{card}S * \text{card}Q]$, donde $\text{card}S$ y $\text{card}Q$ representan los cardinales de los conjuntos S y Q , respectivamente.

b) Función objetivo:

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

donde la función objetivo representa la minimización de los costes de transporte, y c_{ijkr} 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_{ijkr} 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:

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

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

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

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

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

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

$$x_{ijkr} \geq 0 \text{ enteras} \quad (7)$$

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 el conjunto de todos los camiones debe salir de la factoría cargado con el total del producto final demandado, y regresar, todos ellos, 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 deberán 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 era el viaje de mayor duración que podía iniciar un chófer durante ese día. Así, T_k tomó el valor de la duración de dicho viaje, incluyendo los tiempos de carga y descarga en cada nodo. En este caso, no se tuvo en cuenta el número máximo de horas que, por ley, los chóferes pueden conducir por día, debido a que en la solución final se muestra la ruta completa que va a iniciar cada chófer desde la factoría. Así, en cuanto que en función del quinto supuesto, los

viajes pueden durar más de un día, T_k no tiene porqué coincidir con el tope fijado por los requerimientos legales de conducción diaria.

(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 ocurría con las restricciones (4). 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, 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): las variables x_{ijk_r} deben tomar valores enteros, puesto que representan número de viajes a realizar entre dos nodos.

Se hace necesario indicar, con 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. Del mismo modo, la condición de integridad de las variables complica la resolución del programa lineal. Este hecho ha motivado que no se hayan incluido, inicialmente, restricciones de evitación de ciclos donde no estuviera presente el nodo asociado a la factoría ($i=1$). Además, la restricción (1), al obligar que la capacidad de los camiones que salen de la factoría sea, al menos, igual que el máximo de la oferta y demanda global, hace que en la solución final no aparezcan, normalmente, ciclos que no incluyan el nodo inicial.

La principal ventaja de este modelo es la posibilidad de aplicarlo a todas aquellas empresas cuyas actividades de aprovisionamiento y de distribución se realicen con transporte propio, si bien las características propias de cada empresa podrán requerir el ajuste de las variables y de las restricciones para que el modelo pueda ser utilizado con cierta garantía de éxito

3) 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 general que se ha 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, como cabía esperar, la solución final variaba en función de tres factores:

- Localidades (nodos) integrantes del problema (ver Figura 2 y 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 Valdealgorfa (27 días).
- Grupo 3: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda, Valdealgorfa y Guadalajara (12 días).
- Grupo 4: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda, Valdealgorfa y una de las siguientes ciudades: Bilbao, Pamplona, Vitoria o Santander (4 días).
- Grupo 5: Zaragoza, Arguedas, Cadreita, Buñuel, Cáseda, Valdealgorfa 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 o existencia de ciclos en la solución final que no incluyan el nodo asociado a la factoría. *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

Grupos	Variables	Restricciones
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.

RESULTADOS OBTENIDOS

En las conversaciones mantenidas con el director de logística de la empresa éste expresó su interés por el hecho 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%.

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. Las cifras en términos absolutos se han obviado para preservar el deseo de privacidad de la empresa.

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.

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.

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.

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.

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. En el caso que nos ocupa, sería de utilidad ver cómo afectan al coste del transporte 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, etc. De este modo, podrían comprobarse de forma apriorística los efectos de tales cambios en la gestión a muy corto plazo de las actividades de transporte y, a su vez, su impacto en las políticas de aprovisionamiento y distribución.

Por último, y a modo de resumen, se puede afirmar que los resultados del trabajo ponen de manifiesto las siguientes cuestiones:

1) Mejora en los aspectos tácticos y estratégicos de las actividades de transporte: reducción de costes, posibilidad de reestructurar la flota de transporte, necesidad de flexibilizar los horarios de recogida en los puntos de reaprovisionamiento,...

2) Modelización de las relaciones entre las actividades de transporte y las áreas de aprovisionamiento y distribución: permite concienciar a la empresa de la necesidad de mejorar la coordinación entre actividades.

3) La implementación del modelo aplicado en este trabajo puede provocar un cambio de filosofía a la hora de enfocar la toma de decisiones, ayudando a superar la barrera que existe entre la mentalidad de una empresa donde rige la visión tradicional de la logística con otra donde se aplica la visión integrada de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COX, J.F., BLACKSTONE, J.H., Y SPENCE, M.S. (Eds), 1995. *APICS Dictionary (8th de.)* Falls Church, Virginia: American Production and Inventory Control Society.

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, 345pp.

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, 349pp.

- DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y MONTES DE NAVARRA, 1994b. *Anuario de Industrias Agroalimentarias de Navarra*. Diputación Foral de Navarra, Serie agraria, n.31, 349pp.
- DONOVAN, R.M., 1996. *Is Manufacturing a Weak Link in Your Supply Chain?*. *Industrial Management*, November-December, pp.1-3.
- EVANS, J.R., 1984. *The Factored Transportation Problem*. *Management Science*, vol.30, n.8, pp.1021-1024.
- GANESHAN, R., y HARRISON, T.P., 1995. *An Introduction to Supply Chain Management*. (On-Line: [http://silmaril.smeal.psu.edu/misc/supply chain intro.html](http://silmaril.smeal.psu.edu/misc/supply%20chain%20intro.html)), May.
- GÓMEZ, A.C., SALAZAR, A., 1991. *Volumenes 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.
- RHEEM, H., 1997. *Logistics: A Trend Continues*. *Harvard Business Review*, vol. 75, no.1, pp.8-9.
- SANKARAN, J.K., UBGADE, R.R, 1994. *Routing Tankers for Dairy Milk Pickup*. *Interfaces*, vol.24, n.5, pp.59-66.
- SCULLY, J.I., Y FAWCETT, S.E., 1994. *International Procurement Strategies: Challenges and Opportunities for the Small Firm*. *Production and Inventory Management Journal*, Second Quarter, pp. 39-46.
- SZWARC, W., 1975. *Instant Transportation Solutions*. *Naval Research Logistics Quarterly*, vol.22.

TURNER, J.R. 1993. *Integrated Supply Chain Management: What's Wrong with this Picture?*.
Industrial Engineering, December.