

---

# Programación Entera Mejora el Proceso de Licitación de Raciones Alimenticias<sup>1</sup>

---

Rafael Epstein <sup>2</sup>  
Lysette Henríquez <sup>3</sup>  
Jaime Catalán <sup>4</sup>  
Gabriel Weintraub <sup>5</sup>  
Cristián Martínez <sup>6</sup>  
Marzo, 2001

---

## Resumen

---

*En este trabajo se presenta la aplicación exitosa del uso de un modelo matemático para determinar la adjudicación óptima en una licitación de servicios de raciones alimenticias para colegios en Chile. El proceso involucra 180 millones de dólares y la alimentación de un millón trescientos mil niños aproximadamente, siendo una de las licitaciones estatales más importantes en el país. Para mejorar la calidad de la asignación, se desarrolló un modelo de programación lineal entera que decide la adjudicación entre las distintas empresas concesionarias. El modelo cambió radicalmente la naturaleza del proceso en tres aspectos fundamentales. Primero, dio transparencia y objetividad al proceso completo generando competencia entre las empresas. Segundo, permitió a las firmas construir ofertas territorialmente*

- 
- 1 El artículo describe las experiencias realizadas en el proceso de licitación de becas alimenticias de la Junta Nacional de Auxilio Escolar y Becas (JUNAEB) entre los años 1997 y 2000, mientras los autores Epstein, Catalán y Weintraub eran consultores de JUNAEB y la institución era dirigida por la Sra. Lysette Henríquez primero y por el Sr. Ricardo Halabí después. Los autores agradecen a todo el equipo humano de JUNAEB involucrado en el proceso de licitación, en especial a Rodolfo Aguayo y Pablo Céspedes por el trabajo informático y a Ana María Aburto y Germán Schultz por la constante colaboración. Las opiniones aquí expresadas son de los autores y no necesariamente representan aquellas de JUNAEB.
- 2 Depto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile. República 701, Santiago de Chile. repstein@dii.uchile.cl
- 3 Ex-Directora Nacional, Junta Nacional de Auxilio Escolar y Becas (JUNAEB), Chile. PNUD, Méjico. lysette.henriquez@un.org.mx.
- 4 Depto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile. jcatalan@dii.uchile.cl
- 5 Depto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile. gweintra@dii.uchile.cl
- 6 Subdirector Depto. de Supervisión, JUNAEB, Chile. cmartinez@junaeb.cl

*flexibles para así incluir sus economías de escala, llevando a un uso eficiente de los recursos. Finalmente, el modelo encontró la solución óptima, cuestión nada de trivial si se considera que el problema de asignación es NP-completo y tiene alrededor de 5000 variables enteras. Esta nueva metodología, enmarcada en un nuevo proceso de licitación, mejoró notablemente la razón precio-calidad de las raciones alimenticias, generando ahorros en tres años de US\$ 40 millones, equivalentes al costo de alimentar 115.000 niños durante el mismo período.*

---

## 1 Introducción

---

Chile es un país en vías de desarrollo cuyo sistema educacional está formado por 14.000 colegios a lo largo de las 13 regiones geográficas del país. El 91 % de la cobertura escolar es financiada total o parcialmente por el Estado, encargándose de entregar la educación a los niños provenientes de los sectores con menos recursos del país. El 30 % de la población menor a 18 años vive bajo la línea de pobreza. Un factor fundamental para hacer efectiva la igualdad de oportunidades es suplir las carencias de los niños y jóvenes provenientes de los sectores socioeconómicamente vulnerables, a través de programas asistenciales orientados a otorgar alimentación complementaria para reducir el ausentismo y deserción escolar y mejorar el rendimiento escolar, además de programas de salud, vivienda estudiantil y recreación (Henríquez (1999)).

La Junta Nacional de Auxilio Escolar y Becas (JUNAEB), servicio público del sector educación, es la responsable de brindar estos programas asistenciales. En particular, su objetivo fundamental consiste en entregar la alimentación a los alumnos durante su jornada escolar (desayuno, almuerzo, merienda y cena según corresponda). Ésta se brinda en los diferentes colegios con cobertura nacional sin costo para los estudiantes. El presupuesto anual de JUNAEB para programas es de 150 millones de dólares (al año 2000), de los cuales 138 se gastan en el Programa de Alimentación Escolar (PAE), entregando servicios alimenticios a un millón doscientos mil niños aproximadamente. Esto incluye el programa de alimentación regular además del programa de vacaciones y algunos programas de reforzamiento del Ministerio de Educación.

En el año 1980, JUNAEB externalizó los servicios alimenticios a empresas concesionarias, licitando el servicio de raciones alimenticias de los diferentes colegios. En el año 1980 sólo participaron tres empresas, aumentando a treinta en la década del noventa y actualmente el número de empresas participantes es de 26.

JUNAEB tiene un importante poder de negociación frente a las empresas concesionarias debido a los enormes volúmenes de alimentos que demanda. Además posee una vasta experiencia en el rubro, por lo cual también administra los programas de alimentación de JUNJI e INTEGRA, instituciones sociales encargadas de la alimentación de los jardines infantiles del país. La cobertura de ambas instituciones es de 126.000 niños y su presupuesto anual es de 46 millones de

dólares. De esta manera, actualmente, JUNAEB totaliza compras al sector alimentos por 184 millones de dólares anuales, para brindar servicios a 1.326.000 niños aproximadamente.

Cada año se licitan los servicios de raciones alimenticias correspondientes a un tercio del país por un período de tres años. Los montos involucrados en la licitación son del orden de 180 millones de dólares, siendo una de las más grandes para el estado chileno.

Esta es una licitación de alimentación escolar administrada por una institución (JUNAEB), pero que está dirigida a tres instituciones (JUNAEB, JUNJI e INTEGRAL), por lo tanto en su adjudicación requiere conciliar distintos puntos de vista institucionales. Además, entre sus complejidades, está que representa un servicio de alimentación diario que se licita a tres años, pero que puede verse afectado por diversos escenarios bastante cambiantes derivados del largo período de contrato considerado. Por ejemplo, puede variar la cantidad de raciones alimenticias que deben ser brindadas, como también la estructura alimentaria de las distintas raciones, debido a nuevos requerimientos nutricionales.

Los beneficiarios son muy diferentes (sus edades fluctúan entre 2 y 24 años), lo que implica que en la licitación se debe incluir una gran variedad de raciones y servicios de alimentación. De esta manera, el equipo de nutricionistas de JUNAEB ha definido una variedad de productos que deben ser cotizados por las empresas. Por ejemplo, un almuerzo de 850 calorías para enseñanza media, con sus requerimientos nutricionales definidos y la frecuencia de determinados alimentos como carne, pescado y verduras; un desayuno de 350 calorías para enseñanza básica, etc.. Así, una oferta de una empresa debe incluir el territorio geográfico al cual postula y un precio para cada uno de estos 168 productos. En una licitación se presentan alrededor de 4500 de estas ofertas, por lo cual el análisis de todas las combinaciones posibles es altamente complejo.

A pesar de la gran cantidad de dinero involucrado y de la complejidad del problema, hasta el año 1997, la asignación se realizaba utilizando criterios subjetivos, bastante rudimentarios. Básicamente, se aplicaban una serie de filtros sucesivos basados en criterios financieros y técnicos, descartando posibles asignaciones. Así, de manera iterativa se reducía el tamaño del espacio factible hasta obtener una solución, supuestamente de buena calidad. Dado el gran tamaño de la licitación, la solución obtenida era claramente subóptima y, más aún, fácilmente se generaban presiones indebidas sobre los funcionarios responsables de JUNAEB, de parte de las empresas. En este tipo de negociaciones es fundamental adjudicar utilizando métodos objetivos para dar transparencia al proceso. De esta manera, se reduce la posibilidad de que existan presiones ilícitas y se obliga a las empresas a competir vía calidad y precios (Milgrom (1989)).

Conocidos estos antecedentes, en el año 1997, la dirección de JUNAEB le encargó a un equipo de ingenieros de la Universidad de Chile el diseño e implementación de un nuevo mecanismo de asignación para la licitación del servicio de raciones alimenticias. En este trabajo se muestra el desarrollo e implementación de este nuevo mecanismo, en el cual se utiliza un modelo de pro-

gramación lineal con variables binarias para asignar en forma óptima un proceso de licitación a las distintas empresas oferentes. Esta herramienta fue utilizada exitosamente en la licitación de alimentos escolares del año 1997, repitiéndose la experiencia en las licitaciones siguientes de los años 1999 y 2000. En estas dos últimas licitaciones, la metodología fue mejorada introduciendo mayor flexibilidad. Así, fue posible analizar posibles escenarios que podrían darse a lo largo del período de contrato considerado (tres años), pero cuyas definiciones deben ser anuales, encontrando una solución robusta frente a los distintos escenarios. JUNAEB pretende seguir utilizando esta metodología en los futuros procesos de licitación.

La introducción de herramientas matemáticas fue determinante para realizar un proceso de negociación limpio y transparente, generando competencia entre las empresas. Además, el modelo permitió capturar las economías de escala existentes para las firmas participantes. Finalmente el modelo llevó a una asignación óptima de los recursos. De esta manera, fue posible licitar el servicio de raciones alimenticias de la forma más ventajosa posible, aspecto fundamental si se considera que en este proceso se compromete la calidad de la alimentación de alrededor de un millón trescientos mil niños en Chile, muchos de los cuales basan su nutrición en la comida recibida en los colegios.

---

## 2 El Proceso de Licitación

---

Para efectos de la licitación el país se divide aproximadamente en 90 unidades territoriales (desde ahora U.T.). Es decir, en promedio, cada una de las 13 regiones geográficas del país se divide en 7 U.T.. Se licita un tercio de ellas cada año por un período de tres años.

El proceso empieza con el llamado y registro de empresas, donde JUNAEB las clasifica desde el punto de vista administrativo, técnico y financiero. Esto permite, por una parte descartar empresas que no cumplen con los estándares mínimos de confiabilidad y, por otra, clasificarlas de acuerdo a sus capacidades. Existen dos clasificaciones:

- Según su capacidad financiera y operativa, las empresas se clasifican en cinco categorías distintas de acuerdo a la cantidad máxima de U.T. a las que pueden aspirar.
- Según las evaluaciones técnicas realizadas, las empresas obtienen una calificación global de desempeño, la que puede utilizarse en el modelo de asignación como se verá más adelante.

Luego se realiza el llamado público a la licitación y la venta de bases. Posteriormente las empresas concesionarias (que son alrededor de 26) presentan sus ofertas. Lo hacen de manera electrónica, en diskette, el cual recibe una codificación y la relación nombre-código de la empresa queda en Notaría, por lo tanto no es conocido por los evaluadores hasta el momento de la adjudicación.

Las ofertas de las empresas incluyen un proyecto técnico y las ofertas económicas. El proyecto técnico presentado por las empresas se basa en los requerimientos establecidos por JUNAEB, entre los cuales destacan:

- Los nutricionales, en que las diferentes raciones deben cumplir con sus respectivas definiciones nutricionales.
- Los de estructura alimentaria, donde se señalan los tipos de servicios (almuerzo, desayuno, etc.) y la frecuencia o presencia mínima y máxima de determinados alimentos y los requisitos de variedad mínima en las preparaciones.
- Los insumos y sus características mínimas de calidad.
- Las condiciones de operación: higiene, abastecimiento, manipulación, supervisión, etc.
- Los requisitos de infraestructura: mobiliario, equipo y vajilla, etc.

JUNAEB evalúa si cada empresa cumple o no con los requisitos solicitados. Las ofertas de las empresas que califican exitosamente las pruebas anteriores siguen participando en la licitación y compiten vía precios, a través de las ofertas económicas. La forma de licitar cumple con las recomendaciones del Banco Mundial para dar garantías de transparencia: primero definir barreras técnicas para asegurar que los requerimientos mínimos sean satisfechos y luego adjudicar por precio. La calidad de servicio se puede regular aumentando las barreras técnicas.

Cada oferta económica presentada por las empresas concesionarias incluye un conjunto desde 1 a 8 U.T. a cubrir, resguardando el límite máximo que le permite la clasificación respectiva. Las empresas presentan tantas ofertas como quieran y cada oferta se acepta o rechaza por completo, es decir, no es posible aceptar fracciones de ofertas. Por ejemplo, si una empresa presenta una oferta que incluye 5 U.T., el paquete completo se acepta o se rechaza, pero no es posible aceptar la oferta por sólo 3 de las 5 U.T.. Si cierta oferta de una empresa es aceptada, significa que la empresa debe brindar todos los servicios de raciones alimenticias en las U.T. correspondientes a esa oferta.

Al permitir ofertas que sean paquetes de U.T. se busca aprovechar las economías de escala que puedan tener las empresas al brindar un mayor número de prestaciones. Es decir, el precio de una oferta que contiene las U.T. X e Y, probablemente será inferior a la suma de los precios de ofertas separadas e individuales por las mismas dos U.T.. Las economías de escala aparecen por varios motivos: infraestructura común que utilizan U.T. cercanas, descuentos por volumen en la compra de insumos, transporte más eficiente, mejor uso del personal, etc..

En general, las empresas presentan muchas ofertas, que van desde ofertas pequeñas de una sola U.T. a ofertas más abultadas las cuales incluyen varias U.T.. La presentación de ofertas constituidas por paquetes de U.T. lleva a que el problema de asignación sea combinatorial y su solución no trivial. En efecto, el problema resultante contiene problemas combinatoriales clásicos tales como cubrimiento, multi-knapsack y localización, todos ellos pertenecientes a la clase NP-completo (Nemhauser y Wolsey (1988)). El uso de herramientas matemáticas per-

mitió resolver óptimamente este difícil problema combinatorial, haciendo posible aprovechar las economías de escala existentes para las firmas y reduciendo así, el costo total de la asignación.

En cada oferta las empresas deben cotizar 168 productos, correspondientes a diferentes productos definidos por el equipo de nutricionistas de JUNAEB y de las otras dos instituciones participantes. En primer lugar, dado los diferentes servicios brindados, existen treinta tipos de raciones alimenticias, en que cada una establece el número de calorías a brindar y requerimientos nutricionales específicos. Por ejemplo, la ración B350 es un desayuno para enseñanza básica de 350 calorías; la ración M1000 es un almuerzo para enseñanza media de 1000 calorías.

Para cada una de estas raciones, las nutricionistas han definido tres estructuras alimentarias referentes a diferentes combinaciones de alimentos posibles para alcanzar el número de calorías determinado en cada ración. Las estructuras alimentarias son de distinta calidad, con lo cual JUNAEB puede cotizar una variedad de productos, unos mejores que otros. Por ejemplo en un almuerzo de 650 calorías una estructura alimentaria establece diez veces carne al mes (vacuno, pollo, pavo, cerdo o cordero en distintas formas), dos veces legumbre y cuatro veces pescado al mes; mientras que otra alternativa de estructura alimentaria establece catorce veces carne al mes, una vez legumbre y cuatro veces pescado al mes. Es decir, cada producto es una ración alimenticia perfectamente definida por el equipo de nutricionistas de JUNAEB, en que se establece el número de calorías a brindar, los requerimientos nutricionales y la frecuencia de alimentos requeridos. En cada oferta, las empresas deben ofrecer un precio para cada uno de estos productos.

Los precios ofertados corresponden al nivel de demanda del 100 %, es decir, cuando se brinda el número de raciones alimenticias planificadas. Además, las empresas piden un precio más alto por ración, si la demanda baja a un 80 % y un precio aún mayor si baja a un 60 %. Así, se disminuye el riesgo al cual están expuestas las empresas debido a una menor cobertura (huelga de profesores, epidemia de alguna enfermedad, etc.), llevando a una disminución de los precios ofertados para la demanda base del 100 %, que es el escenario más relevante y probable. Por otro lado, las empresas pueden ofrecer un descuento si el nivel de demanda supera un 104 %, en caso que aumente el número de alumnos o se extienda la jornada escolar. Este descuento es un porcentaje parejo por ración.

De esta manera, una oferta económica incluye:

- Las U.T. a las cuales postula.
- Los precios correspondientes a treinta tipos de raciones en que cada una establece un número de calorías a brindar. Para cada una de estas raciones se cotizan precios referentes a tres diferentes alternativas de estructuras alimentarias (**escenarios tipo A**). Adicionalmente, se incluyen la raciones brindadas por JUNJI e INTEGRA.

- Para cada combinación ración-estructura alimentaria mencionada en los puntos anteriores, se presentan tres precios distintos, uno para cada nivel de demanda. Además se ofrece un descuento por ración si el nivel de demanda crece (**escenarios tipo B**).

De esta manera, considerando las diferentes raciones, estructuras alimentarias y niveles de demanda se llega a 168 precios (algunas combinaciones no existen). En la Figura N°1 se presenta una muestra de una parte del Formulario Único de Oferta Económica que deben llenar las empresas por cada oferta que presentan.

Oferta N°: 110			
Código Empresa: 1234			
U.T. Ofertadas: 505 - 506 - 507 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0			
% Descuento por ración si nivel de demanda supera el 104 %: 1,5			
Alternativa Estructura Alimentaria 1			
Tramos Niveles de Demanda	B250	B350	B700
100 - 80	\$ 138,63	\$ 157,63	\$ 362,37
80 - 60	\$ 154,03	\$ 175,14	\$ 402,63
< 60	\$ 184,84	\$ 210,17	\$ 483,16
Alternativa Estructura Alimentaria 2			
Tramos Niveles de Demanda	B250	B350	B700
100 - 80	\$ 143,63	\$ 160,73	\$ 377,32
80 - 60	\$ 159,59	\$ 178,59	\$ 419,24
< 60	\$ 191,51	\$ 214,31	\$ 503,09

Figura 1: Muestra de parte del Formulario Único de Oferta Económica. Por cada oferta que presentan, las empresas deben incluir el código de las U.T. ofertadas, los precios correspondientes a cada ración alimenticia (B250, B350, etc.) y a cada estructura alimentaria (1, 2 o 3), según el tramo del nivel de demanda correspondiente (100-80, 80-60 o < 60). Adicionalmente, se incluye el descuento por ración si el nivel de demanda supera el 104 %.

El costo total de una oferta, dada una estructura alimentaria y nivel de demanda, depende del número de raciones de cada tipo a brindar en cada U.T., el cual depende de la población escolar. El equipo de nutricionistas de JUNAEB determinó dos composiciones diferentes del número de raciones de cada tipo a brindar en cada U.T., llamadas Maestros (**escenarios tipo C**).

El Maestro 1 establece, por ejemplo, que en la U.T. X se brindan 20.000 raciones diarias B250, 15.000 raciones diarias B700, etc.; mientras que el Maestro 2 establece que se deben brindar 20.000 raciones diarias B250, 15.000 raciones diarias B800, etc.. En general, el Maestro 2 considera raciones con un mayor número de calorías que el Maestro 1, algunas de las cuales no se brindan en el actual Programa de Alimentación. Por ejemplo, el Maestro 2 considera almuerzos de 1200 calorías para cierto segmento de estudiantes de enseñanza media, mientras que el Maestro 1 considera almuerzos de 1000 calorías para el mismo segmento. Para un Maestro dado y conociendo los 168 precios de una oferta y las U.T. que cubre, se puede valorar el costo total de una oferta para una estructura

alimentaria y nivel de demanda determinados. Para ello, se deben multiplicar los precios unitarios de cada producto por las cantidades establecida en el Maestro y realizar la suma total.<sup>7</sup>

---

### 3 Modelo Matemático de Asignación

---

El objetivo es escoger una combinación de ofertas (de un total de 4500 ofertas aproximadamente que son candidatas a ser aceptadas) para cubrir todas las U.T. a costo mínimo. La asignación óptima se sensibiliza utilizando dos funciones objetivo distintas: i) considerando sólo el costo asociado a JUNAEB; ii) considerando el costo de las tres instituciones juntas (**escenarios tipo D**).

La calificación global de desempeño obtenida por las empresas según las evaluaciones técnicas (Sección 2) puede ser considerada en la asignación de la siguiente manera. Los precios de las ofertas de las empresas con mejor calificación son reducidos por un factor, privilegiándolas en la adjudicación por sobre las ofertas de empresas con peor desempeño. También se sensibilizan las asignaciones óptimas con y sin utilizar la corrección por el factor de desempeño (**escenarios tipo E**).

Además, se deben considerar las restricciones adicionales del problema, las que se detallan a continuación:

- Para evitar una concentración excesiva, que hace más vulnerable el programa, se limita el número máximo de U.T. que pueden ser asignadas a una empresa. Cada empresa tiene un límite distinto que depende de su capacidad financiera y operativa (Sección 2).
- En la misma línea y para fomentar la diversificación en el sistema, se limita el número de ofertas de una misma empresa que pueden ser aceptadas (**restricciones tipo F**).
- Se impone un número máximo de empresas que pueden ser asignadas a cada una de las regiones geográficas del país, de modo de facilitar la operación de JUNAEB en relación a los mecanismos de control y supervisión sobre ellas (**restricciones tipo G1**).
- Por otro lado, se restringe el número mínimo de empresas por región para poder controlar imprevistos. De esta manera, si alguna empresa falla por algún motivo, sus servicios pueden ser suplantados temporalmente por otra empresa que esté operando en la misma región (**restricciones tipo G2**).
- Sólo se consideran las ofertas que caen dentro de una banda de precios predeterminada, eliminando a-priori ofertas de muy bajo costo que son irrealistas. Este sería el caso de empresas que probablemente han subesti-

---

<sup>7</sup> El modelo matemático descrito a continuación, su posterior resolución e implementación y los resultados obtenidos corresponden a la licitación del año 1999.



mado sus costos y al presentar costos tan bajos resultarían ganadoras en la licitación. Ofertas de tan bajo costo llevarían a una reducción de la calidad y a incumplimientos del contrato por parte de la empresa, problemas que JUNAEB prefiere prevenir (**restricciones tipo H**).

La adjudicación óptima se sensibiliza incluyendo o sin incluir cada una de las restricciones anteriores (F, G y H), de modo de cuantificar el costo monetario asociado a imponer cada una de ellas. Sólo la restricción referente a un número máximo de U.T. por empresa es impuesta siempre. Además, se consideran los distintos escenarios correspondientes a diferentes estructuras alimentarias (A), los niveles de demanda (B), los dos Maestros (C), las dos funciones objetivo (D) y el factor de desempeño (E). De esta manera, realizando el cruce entre todas las variaciones posibles (algunos no existían), se generaron 704 escenarios a analizar, los que se resumen en la Figura N° 2.

Escenarios Analizados		
Variaciones	Descripción	Nº de alternativas
A	Diferentes estructuras alimentarias	3
B	Niveles de demanda (100 %, 104 %, 80 % y 60 %)	4
C	Dos Maestros	2
D	Función objetivo (JUNAEB solamente o tres instituciones)	2
E	Con y sin considerar categoría de desempeño de empresas	2
F	Con y sin considerar límite máximo de ofertas por empresa	2
G	Con y sin considerar límite de empresas por región	2
H	Con y sin descartar ofertas que se salen de la banda de precios	2
<b>TOTAL</b>		<b>704</b>

Figura 2: Se analizaron diversos escenarios correspondientes a los siguientes cruces, lo que generó 704 instancias del modelo.

Para encontrar la asignación óptima en cada uno de estos escenarios se formuló un modelo de programación lineal con variables binarias. Se define una variable binaria por cada oferta, en que la decisión es si aceptar o no la oferta. Además, se define un conjunto de variables binarias auxiliares utilizadas en las restricciones que limitan el número de empresas por región. De esta manera, el modelo incluye 4600 variables binarias.

El modelo contiene varios problemas combinatoriales clásicos como el problema de cubrimiento, multi-knapsack y localización, todos ellos NP-completos. Es decir, nuestro problema de asignación pertenece a la clase de problemas combinatoriales más difíciles de resolver.

La cantidad de instancias del modelo a resolver era 704 y dado los plazos existentes el tiempo para hacerlo escaso, por lo cual era importante que la resolución de cada instancia tomará un tiempo pequeño. Por ello, y dada la potencial complejidad del problema, se agregaron restricciones al modelo de modo de fortalecer la relajación lineal de la formulación. En primer lugar, se agregaron planos de corte, conocidos como "packing" para robustecer la relajación lineal del problema entero.

Adicionalmente, para algunas instancias se desacopló un conjunto de res-

tricciones. Esta técnica de fortalecimiento, frecuente en modelos de localización no capacitados, nos entregó un modelo “expandido” con mejor relajación lineal que el original, pero de mayor tamaño. La idea consistía en que la formulación “expandida” requería menos iteraciones en la etapa de ramificación y acotamiento pero cada iteración era más costosa en tiempo porque el modelo era mayor. Esta formulación se utilizó en las instancias más difíciles con buenos resultados.

El modelo fue programado en FORTRAN 90 y fue resuelto utilizando el programa computacional CPLEX en un computador Pentium III. Se resolvieron las 704 instancias del modelo, cada una en menos de tres minutos, para lo cual fueron necesarios los cortes de “packing”, y en algunos casos, la formulación expandida. En el Apéndice se describe en detalle el modelo de programación lineal entera utilizado para encontrar la asignación óptima de ofertas en cada una de las instancias del modelo analizadas.

---

## 4 Resolución e Implementación

---

Al resolver las diferentes instancias del modelo fue posible encontrar las soluciones óptimas para los distintos escenarios, lo que le permitió a la Comisión de Adjudicación de JUNAEB evaluar diferentes escenarios, como también la calidad y robustez de las soluciones.

Por ejemplo, se determinó el costo total de aumentar la calidad de las raciones alimenticias. Para ello, se comparó el valor de la función objetivo en el óptimo para los escenarios correspondientes a las diferentes alternativas de estructuras alimentarias (A). También se encontró el costo asociado a brindar nuevos tipos de raciones con mayor peso calórico, para lo cual se analizaron las soluciones óptimas de los dos Maestros (C).

Al comparar las soluciones óptimas considerando las dos funciones objetivo (sólo JUNAEB o las tres instituciones) se encontró el costo que le significa a JUNAEB incluir a JUNJI e INTEGRÁ en la licitación (D). Al mismo tiempo, se determinó el costo de las soluciones óptimas asociado a JUNAEB y el costo asociado a las otras dos instituciones. Estas cifras son de mucha importancia porque le permiten a las respectivas instituciones saber si están dentro de su presupuesto y si deben exigir al gobierno un aumento del mismo.

Además fue posible saber cuánto vale realizar una asignación menos riesgosa con empresas que tengan mejor calificación de desempeño (E). También se determinó el aumento del costo de la solución al limitar el número de ofertas por empresa, de modo de diversificar la asignación (F). Asimismo se obtuvo el costo asociado a limitar el número de empresas por región (G) y el asociado a descartar las ofertas que salen de la banda de precios (H).

Adicionalmente, el objetivo era implementar una solución robusta para los distintos escenarios bajo análisis. Por ejemplo, se verificó la consistencia en el comportamiento de la solución óptima para el escenario en el cual se considera el 100 % de demanda y cuando el escenario efectivo es una demanda de solamente el 80 % de lo presupuestado (B). Además, es útil saber que tan robusta es la solución con respecto a las distintas alternativas de estructuras alimentarias, debido a que la asignación puede realizarse considerando una estructura determinada y al año siguiente ésta puede ser cambiada.

El análisis recién mencionado fue llevado a cabo mediante la construcción de tablas con información estadística considerando las soluciones de las diferentes instancias del modelo. Por ejemplo, se hicieron tablas que permitían analizar el desempeño de la solución óptima de una instancia, si el escenario efectivo era uno distinto. Esta información fue estudiada por la Comisión de Adjudicación de JUNAEB para realizar la asignación de la licitación.

En primer lugar, la Comisión decidió que la función objetivo a utilizar era la que incluía las tres instituciones participantes, ya que se deseaba maximizar el beneficio social y no sólo el de una institución en particular. Luego se decidió analizar solamente las soluciones correspondientes al Maestro 1 y a dos alternativas de estructuras alimentarias, ya que el resto excedía notablemente el presupuesto de las instituciones. De esta manera quedaron 128 instancias a analizar. Después se compararon estas dos alternativas de menú decidiendo brindar la más económica, la cual era aproximadamente 2,5 millones de dólares más barata por año. La Comisión de Adjudicación determinó que la diferencia de costo era demasiado alta, considerando que los menús no diferían demasiado en cuanto a su calidad.

Luego se determinó que la institución estaba dispuesta a pagar por tener empresas con mejor calificación de desempeño. Un costo total sólo un 4 % mayor entregaba una solución con empresas, en promedio, 40 % mejor calificadas lo cual era altamente conveniente. También se decidió exigir las restricciones de límite de ofertas por empresa y límite de empresas por región. El costo extra total correspondiente a estas dos exigencias era de 800 mil dólares anuales, costo que la institución estuvo dispuesta a pagar por una asignación más robusta. Por último, se decidió no considerar la restricción de banda de precios, ya que sólo dos ofertas quedaban fuera de la banda en la solución escogida y el costo era aproximadamente un millón de dólares menor que el correspondiente a la solución considerando la banda de precios. Así, se escogió una asignación que incluye a nueve empresas, cada una con una oferta y que tiene un costo anual de 60 millones de dólares para el sistema total y de 45 millones para JUNAEB. La solución obtenida era la óptima para el nivel de demanda correspondiente al 100 %. Sin embargo, se verificó que era muy robusta en relación a los otros niveles de demanda e incluso a otras estructuras alimentarias (estaba a menos del 0,1 % del óptimo en los otros escenarios).

Todo este proceso, que incluye la evaluación de cada escenario y la confección de las estadísticas, se debió realizar en una semana debido a los plazos legales permitidos en el proceso.

## 5 Resultados Obtenidos y Conclusiones

---

La utilización de un modelo matemático para realizar la asignación en la licitación del servicio de raciones alimenticias, en conjunto con otras medidas destinadas a mejorar la gestión de JUNAEB, llevaron a una serie de notables mejoras. Al comparar la licitación del año 1999 (asignada con modelo matemático) con la reemplazada, correspondiente al año 1995 (asignada sin modelo), se observa una mejora sustancial de la calidad de los aportes nutricionales, de la estructura alimentaria de las raciones, de la infraestructura de los servicios de alimentación y de la condición laboral de las manipuladoras en las escuelas. Una comparación detallada de las características de las licitaciones de 1995 y 1999 se encuentra en la Figura N° 3. Todas estas mejoras representan un incremento de costos de 24 % en relación a 1995 (en términos reales), sin embargo, el precio de la ración promedio sólo se incrementó en un 0,76 %. Lo esperado, de acuerdo a la tendencia, hubiera sido un incremento a lo menos de un 22 % en el precio. Si consideramos los tres años que dura la licitación, el ahorro asciende a aproximadamente 40 millones de dólares en todo el período, lo que equivale a la alimentación de 115.000 niños por tres años.

La cobertura de JUNAEB aumentó desde 1995 hasta el año 2000, de 870.000 niños a 1.200.000 niños. Además, según varias encuestas realizadas, se observó que la satisfacción de los estudiantes con respecto a la calidad de la alimentación se mantuvo en un alto nivel. Por último, se debe notar que el año 1997, en el cual se introdujo el modelo matemático para realizar la asignación, fue un punto de inflexión en el mejoramiento del proceso de licitación. En efecto, a pesar de que el presupuesto de JUNAEB decreció en un 1 % en relación al año 1996, la cobertura aumentó en un 8% (Córdova (1999)).

La utilización del modelo matemático para realizar la asignación llevó a estos sobresalientes progresos y ahorros debido a que:

1. Es un método de decisión objetivo y transparente, reduciendo la posibilidad de que se generen presiones indebidas de parte de las empresas involucradas. En efecto, el mecanismo hace que las decisiones sean más objetivas y los resultados obtenidos absolutamente replicables, pudiendo ser mostrados a la opinión pública cuando sean requeridos.
2. Es un mecanismo de adjudicación justo, imparcial y confiable, lo cual genera competencia entre las empresas obligándolas a aumentar su eficiencia y productividad. Así, las empresas mejoraron la calidad del servicio entregado, a un menor precio y aún así teniendo utilidades. En efecto, las utilidades promedio sobre ventas de las empresas aumentaron desde un 3,2 % en 1995 hasta 4,9 % en 1999. Las utilidades promedio sobre capital propio aumentaron desde 28% en 1995 hasta 38 % en 1999, lo que demuestra el aumento en la inversión realizada por las empresas.

Aportes Nutricionales - Nutrientes (Ración B700)	
Licitación 1995	Licitación 1999
Grasas: máximo 30 %. Sacarosa: No especificada. Vitamina C: 19,8 mg. Calcio: 264 mg.	Grasas: máximo 10 %.* Sacarosa: Límite máximo 25 gr.* Vitamina C: 45 mg.* Calcio: 400 mg.* (*): De acuerdo a recomendaciones dietarias.

  

Estructura Alimentaria	
Licitación 1995	Licitación 1999
Lácteos: 1 vez a la semana leche al 50 % y 4 veces a la semana sustituto lácteo con 30 % de leche. Carneos: 4 veces carne molida al mes (20 grs.). Fruta: 4 veces al mes Ensalada: opcional. Pan: opcional. Galletas: opcional.	Lácteos: 4 veces a la semana leche al 50 % y 1 vez a la semana sustituto lácteo con 30 % de leche. Carneos: 6 veces carne al mes (40 grs.) Fruta: 6 frutas frescas al mes más 2 en conserva o deshidratada. Ensalada: 6 veces por mes (60 grs.). Pan: 3 veces por semana en desayuno. Galletas: 1 o 2 veces por semana.

  

Infraestructura
<b>Principal infraestructura adicional en las escuelas sobre el año 1995:</b> Refrigerador / congelador. Campana de Extracción. Lavaplatos de acero inoxidable/enlozado. Luminarias. Vajilla nueva al inicio del programa.

  

Situación Manipuladoras
<b>La situación de las manipuladoras mejora con respecto a 1995 en los siguientes aspectos:</b> Salarios se incrementan en términos reales en 41,5 %. Todos tienen bonos imponibles. Se exige trimestralmente certificado de Inspección del Trabajo de situación al día en materia laboral y previsional.

Figura 3: Comparación de las licitaciones de 1995 y 1999 en relación a los aportes nutricionales, la estructura alimentaria, la infraestructura de los servicios de alimentación y la condición laboral de las manipuladoras en las escuelas.

3. El modelo permitió formular y resolver de manera óptima el problema combinatorial que se genera al permitir que las ofertas sean paquetes de U.T.. De esta manera, fue posible capturar y sacar provecho de las economías de escala existentes para las empresas, tales como ahorros por transporte, descuentos por volumen, etc..
4. En cada escenario se obtiene la combinación de ofertas que minimiza el costo, satisfaciendo todas las restricciones. Dada la gran cantidad de ofertas, esto sería imposible de realizar manualmente y en caso de hacerlo, probablemente se incurriría en pérdidas considerables. En efecto, si se escoge manualmente una asignación 2 % peor a la solución óptima, lo que ocurre fácilmente si no se utiliza una herramienta de solución adecuada, la pérdida alcanzaría los tres y medio millones de dólares, que equivale a las raciones alimenticias de treinta mil niños por un año.
5. Utilizando el modelo matemático, rápidamente se pueden obtener las soluciones óptimas para diferentes escenarios. En este sentido, creemos que las

tablas de información estadística construidas a partir de las soluciones de las distintas instancias del modelo fueron de gran ayuda para encontrar la mejor solución, sobretodo en la reunión de la Comisión de Adjudicación de JUNAEB. Esta información permitió valorar los costos y beneficios de cada escenario. Así se pudo determinar el costo de las diferentes asignaciones para cada una de las instituciones participantes y el costo para JUNAEB correspondiente a incluir a JUNJI e INTEGRA en la licitación. También se determinó el costo de imponer restricciones operacionales, de considerar una banda de precios y de exigir empresas de mejor calidad. Se evaluó el costo de brindar menús con mejor estructura alimentaria y mayor peso calórico. Además se verificó la robustez de la solución obtenida frente a distintas estructuras alimentarias y niveles de demanda.

De esta manera, la solución asignada es óptima en la relación precio-calidad y robusta frente a los posibles escenarios, lo cual es muy relevante en un problema de esta complejidad y que involucra montos de dinero tan elevados.

En el aspecto del modelo y su implementación se puede señalar que las dos formulaciones alternativas con los planos de corte fueron efectivas para resolver todas las instancias del modelo. Debemos mencionar que sin los fortalecimientos que introdujimos, algunas instancias no se podían resolver en los plazos existentes. Esto no es de extrañar si observamos que el problema es claramente NP-completo: contiene los problemas de cubrimiento, multi-knapsack y localización.

La evidencia más clara del éxito de esta aplicación está en el hecho de que una vez realizada en 1997, fue llevada a cabo nuevamente en los años 1999 y 2000. Además, se seguirá utilizando en los futuros procesos de licitación. Un aspecto fundamental a destacar es que en las experiencias realizadas se estableció una metodología a utilizar en cualquier licitación futura, ya sea en este ámbito o en otro similar. De hecho, la misma metodología fue utilizada en dos licitaciones de lentes ópticos realizada por JUNAEB por dos millones de dólares cada una.

Adicionalmente, el hecho de repetir el uso de la metodología ha permitido mejorar y sofisticar el sistema. Es así como desde la licitación del año 1999 se amplió el análisis de escenarios. También, en la licitación del año 2000 se cambió la restricción del máximo número de ofertas por empresa por una restricción de mínimo número de empresas en la asignación. De esta manera, se introdujo al modelo en una forma más conveniente (aprovechando la flexibilidad que entrega la presentación de múltiples ofertas) una restricción que asegura la diversificación en la adjudicación.

Este es un ejemplo de una aplicación exitosa de investigación operativa en un ámbito de gran impacto social. En los países en vías de desarrollo, los programas sociales realizados por el Estado representan una proporción significativa del presupuesto de la Nación. Sin embargo, con frecuencia, las decisiones involucradas en su desarrollo se toman utilizando criterios muy precarios. Este caso muestra que es posible utilizar herramientas sofisticadas para la toma de decisiones en este tipo de problemas, incluso en ambientes en que nunca se habían utilizado. Esto es fundamental si se considera que reducciones de costos en algunos puntos porcentuales

por optimización pueden ser substanciales en valor. Creemos que los profesionales de investigación operativa pueden ser fundamentales en esta dirección, para lo cual es primordial difundir la potencialidad de las herramientas matemáticas en la toma de decisiones dentro de los ejecutivos de este tipo de instituciones.

---

## 6 Apéndice: Modelo Matemático

---

### Parámetros

$R$ : conjunto de regiones geográficas del país.

$I$ : conjunto de unidades territoriales.

$K$ : conjunto de empresas participantes.

$J$ : conjunto de ofertas presentadas.

$c_j(\text{estralim}, \text{niveldda}, \text{maestro}, F.O.)$ : costo de la oferta  $j$  para estructura alimentaria, nivel de demanda y Maestro dados, dependiendo de la función objetivo utilizada (JUNAEB o tres instituciones).

$c_j^{\text{banda}}(\text{estralim}, \text{niveldda}, \text{maestro}, F.O.)$ : costo correspondiente a la banda de precios de la oferta  $j$  para estructura alimentaria, nivel de demanda y Maestro dados, dependiendo de la función objetivo utilizada.

$POND_k$ : ponderador de la empresa  $k$ , de acuerdo a su calificación global de desempeño. Si la evaluación se realiza sin considerar la calificación, el ponderador será uno.

$e(j)$ : empresa que presenta oferta  $j$ .

$u(j)$ : conjunto de unidades territoriales incluidas en oferta  $j$ .

$oer(k,r)$ : conjunto de ofertas presentadas por la empresa  $k$  que incluyen U.T. pertenecientes a la región  $r$ .

$MAXuniemp(k)$ : límite máximo de U.T. aceptables para la empresa  $k$ . Límite depende del tamaño de la empresa y toma valores entre 1 y 8.

$MAXofeemp(k)$ : límite máximo de ofertas aceptables para la empresa  $k$ . Límite se fija igual a uno.

$MINempreg(r)$ : límite mínimo de empresas aceptables en región  $r$ . Límite depende de la región pero en general es cercano a 2.

$MAXempreg(r)$ : límite máximo de empresas aceptables en región  $r$ . Límite depende de la región pero en general es cercano a 4.

## Variables

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{aceptar oferta } j \\ 0 & \text{rechazar oferta } j \end{cases}, \forall j \in J$$

$$Y_{kr} = \begin{cases} 1 & \text{empresa } k \text{ abastecerá alguna U.T. en la región } r \\ 0 & \text{empresa } k \text{ no abastecerá ninguna U.T. en la región } r \end{cases}, \forall k \in K, \forall r \in R$$

## Función Objetivo

Minimizar el costo total de la asignación para estructura alimentaria, nivel de demanda y Maestro dados, dependiendo de la función objetivo utilizada (JUNAEB o tres instituciones) y de si se considera o no la calificación global de desempeño en la asignación.

$$\min \sum_j c_j(\text{estralim}, \text{niveldda}, \text{maestro}, \text{F.O.}) \cdot X_j \cdot \text{POND}_{e(j)}$$

## Restricciones

(1) Todas las unidades territoriales deben ser cubiertas.

$$\sum_{j:i \in u(j)} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I$$

(2) Límite de unidades territoriales asignadas a cada empresa.

$$\sum_{j:k=e(j)} X_j \cdot |u(j)| \leq \text{MAXuniemp}(k) \quad \forall k \in K$$

(3a) Cálculo de variables  $Y_{kr}$ .

$$Y_{kr} \leq \sum_{j:j \in \text{oer}(k,r)} X_j \quad \forall k \in K, \forall r \in R$$

(3b) Cálculo de variables  $Y_{kr}$ .

$$\sum_{j:j \in \text{oer}(k,r)} X_j \leq |\text{oer}(k,r)| \cdot Y_{kr} \quad \forall k \in K, \forall r \in R$$



(4) Límite de ofertas por empresa (opcional).

$$\sum_{j:k=e(j)} X_j \leq MAXofeemp(k) \quad \forall k \in K$$

(5) Límite de empresas por región (opcional).

$$MINempreg(r) \leq \sum_{k \in K} Y_{kr} \leq MAXempreg(r) \quad \forall r \in R$$

(6) Descartar ofertas que salen de la banda de precios (opcional).

$$X_j = 0 \text{ si}$$

$$c_j(\text{estralim, niveldda, maestro, F.O.}) < c_j^{\text{banda}}(\text{estralim, niveldda, maestro, F.O.}) \quad \forall j \in J$$

(7) Integrabilidad de las variables.

$$X_j, Y_{kr} \in \{0, 1\}$$

Las restricciones (1) definen un clásico problema de cubrimiento, donde las U.T. son los elementos a cubrir y las ofertas los elementos cubridores. Las restricciones (2) constituyen un multi-knapsack. Las restricciones (3) obligan a activar las variables Y sólo cuando se han activado las correspondientes variables X. Las restricciones (4) y (5) son cotas generalizadas para las variables X e Y respectivamente. El número de variables binarias es aproximadamente 4600. El modelo en su conjunto es la combinación de clásicos problemas combinatoriales, cada uno de ellos NP-completo.

Como se dijo en la Sección 3, la cantidad de instancias del modelo a resolver eran 704 y el tiempo para hacerlo escaso, por lo cual era importante que la resolución de cada instancia tomará un tiempo pequeño. Por ello, y dada la potencial complejidad del problema, se agregaron restricciones al modelo de modo de fortalecer la relajación lineal de la formulación. En primer lugar, se agregaron los siguientes planos de corte, redundantes con el conjunto de restricciones (2) del modelo, pero que robustecen la relajación lineal del problema entero:

$$\sum_{(j:k=e(j)) \wedge (|u(j)| > MAXuniemp(k)/2)} X_j \leq 1 \quad \forall k \in K.$$

Estas restricciones que tienen una validez evidente, se conocen como "packing" y son muy utilizadas para formular problemas de knapsack o de estable máximo (Nemhauser y Wolsey (1988)).

Adicionalmente, para algunas instancias se desacoplaron las restricciones (3b) de la siguiente forma:

$$X_j \leq Y_{kr} \quad \forall j \in ocr(k, r), \forall k \in K, \forall r \in R.$$

Esta técnica de fortalecimiento, frecuente en modelos de localización no capacitados, nos entregó un modelo “expandido” con mejor relajación lineal que el original, pero de mayor tamaño. La idea consistía en que la formulación “expandida” requería menos iteraciones en la etapa de ramificación y acotamiento pero cada iteración era más costosa en tiempo porque el modelo era mayor. Esta formulación se utilizó en las instancias más difíciles con buenos resultados.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] Córdova, S. (1999), “Impacto del Uso de Métodos de Optimización en la Adjudicación de Grandes Licitaciones y Su Aplicación a la Junta Nacional de Auxilio Escolar y Becas (JUNAEB),” *Estudio de Caso, MBA, Universidad de Chile*.
- [2] Henríquez, L. (1999), “JUNAEB, Red Nacional de Apoyo al Estudiante,” *Encuentro Sudamericano Sobre Alimentación Escolar*.
- [3] Milgrom, P. (1989), “Auctions and Bidding: A Primer,” *The Journal of Economic Perspectives*, Vol. 3, No. 3.
- [4] Nemhauser, G. y L. Wolsey (1988), “Integer and Combinatorial Optimization,” John Wiley & Sons, Inc.