
ESTRATEGIA DE ENSEÑANZA PARA LA UBICACIÓN DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS EN CADENAS DE SUMINISTRO

TEACHING STRATEGY FOR FOOD PROCESSING PLANT LOCATING IN SUPPLY CHAIN DESIGN

Christian O. Díaz-Ovalle^{1,*}, Erika Ramos-Ojeda¹, Florianne Castillo-Borja²

(1) Tecnológico Nacional de México/I. T. Roque, Departamento de Ingenierías, km 8 carretera Celaya-Juventino Rosas, Celaya, Guanajuato, 38110 - México

(2) Tecnológico Nacional de México/I. T. Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Química, Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote., Aguascalientes, Aguascalientes, 20256 - México

* autor de contacto (e-mail: christian.do@roque.tecnm.mx)

Recibido: 13/10/2021 - Evaluado: 05/12/2021 - Aceptado: 18/12/2021

RESUMEN

El diseño de cadenas de suministro es vinculado a la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Además, la ubicación de plantas de alimentos es fundamental en el diseño de procesos de producción. A pesar de su importancia, ambos temas no son tratados regularmente en las clases de licenciatura, debido a la complejidad de los modelos matemáticos generados. La literatura presenta una diversidad de modelos extensos que fusiona ambos temas, aquí un modelo disyuntivo lineal es propuesto como una opción de mayor simplicidad para aplicar durante la impartición de clases. El planteamiento permite ubicar una planta procesadora de alimentos bajo los modelos del problema de transporte y el problema de redes. Aquí, ambos modelos han sido adaptados a una estrategia de enseñanza para estudiantes de licenciatura, basada en: obtención del modelo y solución numérica. Estas etapas son descritas y ampliadas en dos casos de estudio propios de aplicaciones básicas del tema.

ABSTRACT

The design of supply chains is linked to the career of Food Industry Engineering. In addition, the location of food plants is fundamental in the design of production processes. Despite their importance, both topics are not regularly addressed in undergraduate classes, due to the complexity of the mathematical models generated. The literature has provided a diversity of complex models in respect of, but herein a disjunctive model is proposed in order to reduce the high teaching demand. This model locates a food processing plant by considering both the transport problem and the network problem. These approaches have been adequated into a teaching strategy for undergraduate students, this strategy contains: model formulation and numerical solution. These steps are described and extended in two case studies of basic applications of the subject.

Palabras clave: SOLVER ®, problema de transporte, problema de redes, industria alimentaria
Keywords: SOLVER ®, transport problem, network problem, food industry

INTRODUCCIÓN

El problema de la ubicación de plantas industriales investiga la ubicación física posible que minimice el costo de satisfacción de las demandas (por los clientes) sujeto a restricciones propias de la planta industrial (Chopra & Meindl, 2001; Drezner & Hamacher, 2002; Francis *et al.*, 1996; Hale & Moberg, 2003). Este procedimiento considera factores importantes: recurso humano, caracterización física de la zona, costos, servicios y suministros (Brown & Gibson, 1972; Friedrich, 1929). Con base a esto, la localización puede ser realizada bajo los contextos estratégicos respecto a: proceso, mercado y materia prima (Díaz-Ovalle, 2021).

La decisión de localización podría ser el elemento más crítico y difícil del diseño en una cadena de suministro. El motivo de esto, son los elevados costos fijos para la construcción de la planta, la cual no puede cambiar una vez instalada (Daskin *et al.*, 2005). Por lo cual, el análisis debe ser riguroso y profundo. Chopra y Meindl (2001), describieron detalladamente las fases para el diseño de una cadena de suministro que garantice un mínimo de costo, las fases son: 1) definición del objetivo de la cadena de suministro, 2) identificación de los factores importantes de ubicación para instalaciones industriales, 3) determinación de los sitios potenciales de ubicación de la instalación y 4) selección del sitio óptimo. La solución de las últimas dos fases está basada en modelos matemáticos que aproximen una ubicación certera. Este problema no es nuevo y una gran cantidad de propuestas de solución ha sido publicada. Hale y Moberg (2003), Klose y Drexel (2005), Melo *et al.* (2009), Mula *et al.* (2010) y Sanabria-Coronado *et al.* (2017) publicaron revisiones bibliográficas extensas sobre este tipo de modelos.

La industria de alimentos es un caso importante y particular para el diseño de cadenas de suministro, las cuales involucran a elementos agroindustriales como: productores primarios, proveedores, distribuidores y almacenes (Beamon, 1998). Estos sistemas están basados en rutas de distribución, donde los centros de almacenaje y las plantas procesadoras deben ser ubicados en lugares estratégicos (Mula *et al.*, 2010). Soto-Silva *et al.* (2016), analizaron un caso de la industria de procesamiento de frutas usando este tipo de modelos, lo cual demostró la aplicabilidad de esta estrategia. No obstante, estos modelos han sido modificados para lograr la solución de problemas particulares en el diseño de plantas de alimentos.

La ubicación de plantas de procesamiento de alimentos es un caso recurrente en la definición de cadenas de suministro (Díaz-Ovalle, 2021). Esto ha demandado la modificación de los modelos de cadenas de suministro. Geoffrion y Graves (1974), propusieron un trabajo pionero sobre la ubicación de centros de distribución en una cadena de suministro, el cual consideró una programación mixta entera lineal (MILP). Este tipo de problema fue tratado por Perl y Daskin (1985) y Daskin *et al.* (2005), donde describen la generación de modelos en cadena de suministro basados en el problema de transporte. Posteriormente, estas propuestas fueron reunidas y analizadas bajo las revisiones literarias de Araneda-Martínez y Morga-Suazo (2005), Melo *et al.* (2007) y Alizadeh (2009). La importancia de estos modelos es demostrada por sus aplicaciones en la industria alimentaria como lo son: a) reformulación de una red de distribución para aumentar las ganancias de una industria láctea (Pooley, 1994), b) diseño de una red de alimentos no perecederos (Tüshaus & Wittmann, 1998), c) ubicación de plantas lácteas en un rediseño de redes de suministro (Wouda *et al.*, 2002), d) localización de almacenes bajo la demanda en frutas de bayas (Levén & Segerstedt, 2004) y e) ubicación de puntos de distribución de alimentos perecederos en India (Avittathur *et al.*, 2005). Las aplicaciones descritas son evidencia del conocimiento requerido durante la enseñanza en ingenierías relacionadas con industrias alimentarias.

El tema de diseño de plantas alimentarias incluye la ubicación de estas bajo cadenas de suministro sujetas a rutas de transporte o redes (Díaz-Ovalle, 2021). No obstante, el estudiante debe lograr el aprendizaje adecuado de este tema bajo diversas estrategias didácticas, así es posible garantizar soluciones certeras a un problema aplicado. Hasta el momento, los métodos de enseñanza solo han sido enfocados a cadenas de suministro. Johnson y Pyke (2000), presentaron un análisis de la importancia de crear elementos pedagógicos aceptables sobre este tema, ya que una gran cantidad de ingenierías demandan su aplicación. Este análisis definió un conjunto de categorías del tema y su existencia en distintas universidades. Santamaria-Peraza (2012), definió un panorama sobre la

enseñanza de este tema en estudiantes de ingeniería industrial. Actualmente, el uso de paquetes computacionales educativos en la enseñanza de cadenas de suministro han demostrado ser adecuados (Perea-Muñoz *et al.*, 2013; Reyes-Palacio & Gutiérrez-Quintero, 2019; Sweeney *et al.*, 2010). Sin embargo, estas estrategias de enseñanza existentes, sobre cadenas de suministro, no han considerado la ubicación de plantas alimentarias.

La literatura no ha provisto información sobre su extensión a la enseñanza de ubicación de plantas alimentarias bajo cadenas de suministro sujetas a rutas de transporte o redes. Este trabajo presenta una alternativa para el desarrollo y enseñanza de este tipo de modelos y su solución, los cuales son particularizados en plantas de procesamiento de alimentos. Estos modelos siguen una formulación disyuntiva, que no ha sido propuesta en la literatura; y, la estrategia didáctica está enfocada a estudiantes de nivel licenciatura para el desarrollo de sus propios modelos. Las siguientes secciones describen detalladamente la estructura de esta estrategia.

FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

La literatura presenta una gran cantidad de trabajos sobre la ubicación de plantas industriales y, particularmente, su inclusión en la cadena de suministro. Klose y Drexler (2005), han presentado una clasificación pertinente sobre estos modelos. En este trabajo, el análisis está enfocado en los modelos del problema de transporte y del problema de redes. Estos han demostrado una importante aplicación en la cadena de suministros considerando la producción y procesamiento de alimentos. Además, estos modelos son clasificados como problemas de ubicación considerando la capacidad de la instalación problema de localización simple de plantas, los cuales permiten la selección oportuna de la planta. Este trabajo propone un tratamiento que involucra una restricción disyuntiva, cuyo enfoque permite a los estudiantes definir la existencia de opciones de ubicación de la planta procesadora. Además, la intención principal de este trabajo es presentar una formulación útil para los estudiantes de licenciatura y no la comparación de este modelo con otros de la literatura. Por otra parte, esta sección presenta estos fundamentos y el tratamiento matemático necesario para obtener un modelo mixto entero lineal.

Planteamiento de los modelos de suministro

Los modelos de suministros de este trabajo son el problema de transporte y el problema de redes. En ambos casos, la ubicación de las plantas corresponde a nodos candidatos en una ubicación intermedia de la cadena de suministro, es decir estos nodos tendrán un conjunto de opciones de ubicación que tendrán costos propios. En principio, ambos problemas tienen el objetivo de determinar las cantidades de envío entre los nodos predeterminados para minimizar el costo total (suma del producto de la cantidad enviada y el costo de envío), el problema está definido como:

Dados:

- Un conjunto de nodos de envío $j \in J$
- Un conjunto de nodos de recepción, $k \in K$
- Un conjunto de ubicaciones candidatas en cada nodo, $i \in I$
- La capacidad límite de materia enviada desde un nodo j , P_j
- La capacidad límite de materia recibida en un nodo k , R_k

Determinar:

- El costo de envío por unidad de materia transportada en los nodos j y k , $C_{j,k}$
- El costo de envío por unidad de materia de una ubicación candidata en el nodo k , $CC_{i,j,k}$
- El costo de envío entre los nodos j y k dado un candidato de ubicación seleccionado, $U_{j,k}$
- El nodo candidato seleccionado (TRUE o FALSE), Y_i
- La cantidad de materia transportada en los nodos j y k , $x_{j,k}$

Para minimizar:

- El costo total, F .

Modelo de suministro basado en el problema de transporte

El problema de transporte cuenta con niveles jerárquicos de envío que corresponden a: nodos productores, nodos intermedios (plantas procesadoras) y nodos finales (almacenes). Los niveles presentan interconexión al siguiente nivel jerárquico. El problema de transporte está formado de puntos de producción, j , que satisfacen puntos de recepción, k ; donde cada nodo tiene una cantidad límite, ya sea producción, P_j , y recepción, R_k . La cantidad de nodos entre los niveles no necesariamente son iguales. El modelo generalizado incluye: conservación de las cantidades producidas, conservación de las cantidades recibidas y la función objetivo. Esto es posible a través de la suma total de las cantidades involucradas en cada punto. La aplicación de este método en la ubicación de plantas es posible si son definidas las ubicaciones candidatas como puntos de producción (para satisfacer una demanda) o como puntos de recepción (considerando a los proveedores como puntos de producción). La Tabla 1 contiene este modelo disyuntivo.

Tabla 1: Modelos disyuntivos para la ubicación de plantas.

Basado en el problema de transporte	Basado en el problema de redes
$\min F = \sum_j \sum_k x_{j,k} C_{j,k} + \sum_j \sum_k u_{j,k}$ <p>s.a.</p> $\sum_k x_{j,k} \leq P_j$ $\sum_j x_{j,k} \leq R_k$ $\sum_j \sum_k x_{j,k} = \sum_j P_j$ $\forall_{i \in I} \begin{bmatrix} Y_i \\ u_{j,k} = x_{j,k} C_{j,k,i} \end{bmatrix}$ $x_{j,k} \geq 0$	$\min F = \sum_j \sum_k x_{j,k} C_{j,k} + \sum_j \sum_k u_{j,k}$ <p>s.a.</p> $\sum_k x_{j,k} - \sum_j x_{j,k} = P_j$ $\forall_{i \in I} \begin{bmatrix} Y_i \\ u_{j,k} = x_{j,k} C_{j,k,i} \end{bmatrix}$ $x_{j,k} \geq 0$

Modelo de suministro basado en el problema de redes

El problema de redes está dado con nodos definidos arbitrariamente (siguiendo la necesidad del diseño). Este problema puede tener como objetivo el diseño de (Hillier & Lieberman, 2004): a) ruta en tiempo mínimo, b) envío de cantidad máxima y c) envío con costo mínimo. Este trabajo aplica tercer caso con nodos y ubicaciones candidatas para enviar y recibir producto. Las cantidades enviadas son conservativas para cada nodo: positivas si dejan el nodo y negativas si llegan al nodo. La aplicación de este método en la ubicación de plantas es posible si son definidas las ubicaciones candidatas como nodos de la red. El modelo disyuntivo está indicado en la Tabla 1.

Convexificación de modelos disyuntivos lineales

El resultado de esta técnica es un modelo con una variable entera que indica la elección de un elemento a partir de un conjunto de candidatos (Türky & Grossmann, 1996). La formulación matemática disyuntiva incluye restricciones en los elementos de las disyunciones e indica su selección con variables Booleanas (Balas, 1998). La Tabla 2 contiene estas formas para una restricción disyuntiva dados: conjunto de elementos de la disyunción $d \in D$, conjunto de funciones $m \in M$, conjunto de variables desconocidas $n \in N$, variable Booleana, $y \in \{0,1\}$, variable desconocida, z_n , funciones de igualdad y desigualdad, $\lambda_{m,d}$ y $\mu_{m,d}$, respectivamente, respecto a los valores constantes $v_{m,d}$ y $w_{m,d}$ respectivamente.

Tabla 2: Expresiones de una disyunción y su forma desagregada bajo convexificación.

Expresión de una disyunción	Disyunción desagregada
$\bigvee_{d \in D} \begin{bmatrix} YW_d \\ \lambda_{m,d}(z_n) = V_{m,d} \\ \mu_{m,d}(z_n) \leq W_{m,d} \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} z_n &= \sum_d z_{n,d} \\ \lambda_{m,d}(z_{n,d}) &= V_{m,d} BB_d \\ \mu_{m,d}(z_{n,d}) &\leq W_{m,d} BB_d \\ \sum_d BB_d &= 1 \\ L_n BB_d &\leq z_{n,d} \leq U_n BB_d \end{aligned}$

La solución de la programación disyuntiva demanda un tratamiento matemático. Una opción es la reformulación bajo una programación mixta (lineal o no-lineal), donde la selección de un elemento i será posible con una variable binaria, BB_d (valor de 1 para la selección, lo contrario 0). La literatura presenta diversas técnicas para este tratamiento, donde el *convex-hull* ha mostrado aceptación suficiente (Floudas, 1995; Lee & Grossmann, 2000; Lee & Grossmann, 2003; Sawaya & Grossmann, 2005; Vecchiotti & Grossmann, 2000). Esta técnica parte de la desagregación de la variable z_n , esta variable estará dada para cada elemento d de la disyunción: $z_{n,d}$. Para garantizar un valor único, las siguientes sumas son incluidas: $z_n = \sum_d z_{n,d}$ y $\sum_d BB_d = 1$; igualmente, las restricciones $BB_d L_n \leq z_{n,d} \leq BB_d U_n$, donde L y U son valores de las cotas inferior y superior, respectivamente, de la variable z_n . La Tabla 2 contiene la aplicación de esta técnica para la disyunción indicada, siendo válida para $\lambda_{m,d}$ y $\mu_{m,d}$ como funciones lineales. Un tratamiento distinto es aplicado a términos bilineales de $z_{n,d}$ y no-linealidades de $\lambda_{m,d}$ o $\mu_{m,d}$ (Lee & Grossmann, 2000; Lee & Grossmann, 2003).

Tabla 3: Expresiones de disgregar la disyunción de los modelos de ubicación en cadenas de suministro.

Desagregación de variables	Restricción de la disyunción	Cotas de las variables	Tratamiento de variables binarias
$u_{j,k} = \sum_i u_{j,k,i}$ $x_{j,k} = \sum_i x_{j,k,i}$	$u_{j,k,i} = x_{j,k,i} CC_{j,k,i}$	$0 \leq u_{j,k,i} \leq B_{k,i} R_k CC_{j,k,i}$ $0 \leq x_{j,k,i} \leq B_{k,i} R_k$	$\sum_i B_{k,i} = 1$

Tabla 4: Modelos MILP para la ubicación de plantas en cadenas de suministro.

Modelo MILP del problema de redes	Modelo MILP del problema de transporte
$\min F = \sum_k \sum_j x_{j,k} C_{j,k} + \sum_j \sum_k \sum_i x_{j,k,i} CC_{j,k,i}$ <p>s.a.</p> $\sum_k x_{j,k} - \sum_j x_{j,k} + \sum_k \sum_i x_{j,k,i} - \sum_j \sum_i x_{j,k,i} = P_j$ $x_{j,k,i} \leq B_{k,i} \cdot P_{TOTAL}$ $\sum_i B_{k,i} = 1$ $x_{j,k}, x_{j,k,i} \geq 0$	$\min F = \sum_k \sum_j x_{j,k} C_{j,k} + \sum_j \sum_k \sum_i x_{j,k,i} CC_{j,k,i}$ <p>s.a.</p> $\sum_k x_{j,k} + \sum_k \sum_i x_{j,k,i} \leq P_j$ $\sum_j x_{j,k} + \sum_j \sum_i x_{j,k,i} \leq R_k$ $\sum_j \sum_k x_{j,k} + \sum_j \sum_i x_{j,k,i} = \sum_j P_j$ $x_{j,k,i} \leq B_{k,i} \cdot R_k$ $\sum_i B_{k,i} = 1$ $x_{j,k}, x_{j,k,i} \geq 0$

La disyunción de los modelos de suministro, contenidos en la Tabla 1, es tratada por esta técnica. Las variables $u_{j,k}$ y $x_{j,k}$ son desagregadas con las variables $u_{j,k,i}$ y $x_{j,k,i}$, y la variable binaria $B_{k,i}$ es usada para la selección de los elementos de la disyunción. La Tabla 3 contiene las expresiones obtenidas bajo este procedimiento, las cuales son usadas en los modelos de la Tabla 2 para formular los modelos de programación mixta entera lineal (MILP) para la ubicación de plantas basados en cadenas de suministro. Finalmente, la Tabla 4 contiene los modelos MILP

para el problema de redes y de transporte para la ubicación de plantas procesadoras de alimentos. Las siguientes secciones describen la enseñanza de estos modelos y su uso en casos particulares, así como el procedimiento de solución. Estos modelos no requieren modificaciones ni ajustes posteriores siempre que estén basados para casos lineales deterministas.

METODOLOGÍA DE LA ESTRATEGIA DE ENSEÑANZA

La enseñanza de este tópico inicia con la creación de una necesidad en el estudiante. Una serie de preguntas detonantes pueden ayudar, tales como: ¿Por qué es importante ubicar plantas? ¿Creen que la planta de X vecina podría estar en un lugar mejor? ¿Por qué ubicaron la planta X en ese lugar? Etc. El docente debe involucrar al estudiante en el análisis geográfico regional, esto incrementa una confianza en el aporte de ideas y en la aceptación de la necesidad. El estudiante comenzará con lluvias de ideas que deben contener los elementos de este tópico. Así, el docente puede guiar y mantener la necesidad. No obstante, el análisis de los modelos presentados genera una barrera en los estudiantes de licenciatura, la cual debe ser tratada procedimentalmente como: a) análisis de un caso (ficticio o real), b) formulación del modelo y c) solución del caso.

Formulación de modelos particulares

El estudiante debe comprender que la red mostrada no es espacial, sino que esta sigue una cadena de suministro, y que cada nodo es un elemento de la red, cuya ubicación espacial no sigue, necesariamente, lo mostrado en la red. Bajo esto, la generación de los modelos inicia con la comprensión de la red (dirección de los envíos) y tiene un elemento principal: identificación del nodo que cuenta con potenciales ubicaciones. Sin embargo, un ejercicio inicial es el realizar el modelo sin la existencia de ubicaciones potenciales, esto como forma introductoria para que el estudiante realice un bosquejo de la red. Ese modelo será modificado con base a las potenciales ubicaciones. Inicialmente, la generación del modelo identifica las variables de cantidad de envíos (x) y sus costos (C), cuyos subíndices serán nodo envío-nodo recepción. Adicionalmente, las cantidades máximas de producción (R) y recepción (P) son involucradas. La Figura 1 contiene un ejemplo para cada tipo de sistema nodal, cuya rotulación incluye estas variables.



Fig. 1: Sistemas nodales para cada problema: a) Problema de transporte y b) problema de redes. El nodo con candidatos de ubicación es resaltado.

La inclusión de los candidatos está basada en la cantidad de envío o recepción y los costos de envío, los cuales son definidos para la relación de cada candidato con los nodos de interconexión. Para el ejemplo de la Figura 1, dos candidatos son analizados para cada caso y para los nodos resaltados. Esta estrategia involucra los modelos de la Tabla 4, cuyo resultado está mostrado en la Tabla 5. La formulación de los problemas de la Figura 1 puede seguir la siguiente estrategia:

- Modelo de transporte: análisis de la conservación de la cantidad enviada a nivel jerárquico: nodos iniciales (nodos de envío) y nodos finales (nodos de recepción). El estudiante debe relacionar las restricciones como: la suma de las cantidades recibidas, en A, B o C, es menor o igual a variables R de cada nodo, y la suma de cantidades enviadas, por 1 o 2, es menor o igual a las variables P.

- Modelo de redes: análisis de la conservación de la cantidad enviada y recibida para cada nodo, similar a realizar un balance de materia: entradas – salidas = 0. El estudiante debe revisar cada nodo para relacionarlo con los demás.

Tabla 5: Modelos MILP para la ubicación de plantas en cadenas de suministro.

Modelo de transporte		Modelo de redes	
Descripción	Expresión matemática	Descripción	Expresión matemática
Nodo 1	$x_{1,A} + xc_{1,B,1} + xc_{1,B,2} + x_{1,C} \leq P_1$	Nodo A	$x_{A,C} + x_{A,E} + x_{A,F} = P_A$
Nodo 2	$x_{2,A} + xc_{2,B,1} + xc_{2,B,2} + x_{2,C} \leq P_2$	Nodo B	$xc_{B,D,1} + xc_{B,D,2} + x_{B,E} = P_B$
Nodo A	$x_{1,A} + x_{2,A} \leq R_A$	Nodo C	$xc_{C,D,1} + xc_{C,D,2} - x_{A,C} - xc_{D,C,1} - xc_{D,C,2} = 0$
Nodo B	$xc_{1,B,1} + xc_{1,B,2} + xc_{2,B,1} + xc_{2,B,2} \leq R_B$	Nodo D	$xc_{D,C,1} + xc_{D,C,2} + xc_{D,E,1} + xc_{D,E,2} + xc_{D,F,1} + xc_{D,F,2} - xc_{B,D,1} - xc_{B,D,2} - xc_{C,D,1} - xc_{C,D,2} = 0$
Nodo C	$x_{1,C} + x_{2,C} \leq R_C$	Nodo E	$x_{E,F} - x_{A,E} - x_{B,E} - xc_{D,E,1} - xc_{D,E,2} = 0$
Suma total	$x_{1,A} + x_{1,C} + x_{2,A} + x_{2,C} + xc_{1,B,1} + xc_{1,B,2} + xc_{2,B,1} + xc_{2,B,2} = P_1 + P_2$	Nodo F	$-x_{A,F} - x_{E,F} - xc_{D,F,1} - xc_{D,F,2} = 0$
Cantidades candidatas	$xc_{1,B,1}, xc_{2,B,1} \leq B_{B,1}, R_B$ $xc_{1,B,2}, xc_{2,B,2} \leq B_{B,2}, R_B$	Cantidades candidatas	$xc_{B,D,1}, xc_{C,D,1}, xc_{D,C,1}, xc_{D,E,1}, xc_{D,F,1} \leq B_{D,1} (P_A + P_B)$ $xc_{B,D,2}, xc_{C,D,2}, xc_{D,C,2}, xc_{D,E,2}, xc_{D,F,2} \leq B_{D,2} (P_A + P_B)$
Binarias	$B_{B,1} + B_{B,2} = 1$	Binarias	$B_{D,1} + B_{D,2} = 1$
Positividad	$x_{1,A}, x_{1,C}, x_{2,A}, x_{2,C} \geq 0$ $xc_{1,B,1}, xc_{1,B,2}, xc_{2,B,1}, xc_{2,B,2} \geq 0$	Positividad	$x_{A,C}, x_{A,E}, x_{A,F}, x_{B,E}, x_{E,F} \geq 0$ $xc_{B,D,1}, xc_{C,D,1}, xc_{D,C,1}, xc_{D,E,1}, xc_{D,F,1} \geq 0$ $xc_{B,D,2}, xc_{C,D,2}, xc_{D,C,2}, xc_{D,E,2}, xc_{D,F,2} \geq 0$
Función Objetivo	$F = x_{1,A}C_{1,A} + x_{1,C}C_{1,C} + x_{2,A}C_{2,A} + x_{2,C}C_{2,C} + xc_{1,B,1}CC_{1,B,1} + xc_{1,B,2}CC_{1,B,2} + xc_{2,B,1}CC_{2,B,1} + xc_{2,B,2}CC_{2,B,2}$	Función Objetivo	$F = x_{A,C}C_{A,C} + x_{A,E}C_{A,E} + x_{A,F}C_{A,F} + x_{B,E}C_{B,E} + x_{E,F}C_{E,F} + xc_{B,D,1}CC_{B,D,1} + xc_{C,D,1}CC_{C,D,1} + xc_{D,C,1}CC_{D,C,1} + xc_{D,E,1}CC_{D,E,1} + xc_{D,F,1}CC_{D,F,1} + xc_{B,D,2}CC_{B,D,2} + xc_{C,D,2}CC_{C,D,2} + xc_{D,C,2}CC_{D,C,2} + xc_{D,E,2}CC_{D,E,2} + xc_{D,F,2}CC_{D,F,2}$

Técnicas de solución

Los modelos mixtos enteros lineales son resueltos por: la plataforma GAMS®, el servidor NEOS®, el software SAS/OR®, el paquete LINGO® y la herramienta SOLVER® de MSEXcel®. Estas herramientas están sustentadas en algoritmos como CPLEX, LGO, BARON, MINOS, etc. No obstante, la mayoría de los paquetes comerciales tiene limitantes para los estudiantes de licenciatura: costo de licencia y lenguaje programable. Lamentablemente, los estudiantes pierden interés en el tema y solo están enfocados en la acreditación de la materia, en algunos casos continúan usando los paquetes pero su aplicación es limitada. Sin embargo, SOLVER® de MSEXcel® es una herramienta versátil, a la cual pueden tener acceso con mayor facilidad; y, la incorporación de modelos básicos es factible, ya que el estudiante puede definir a través del ambiente gráfico de MSEXcel®: a) la celda objetivo función objetivo (celda objetivo), b) variables (celdas de búsqueda), c) restricciones (cedas con funciones o arreglos de celdas) y d) variables binarias (celdas de búsqueda binaria). Para un arreglo de celdas esto demanda consistencia en el tamaño del arreglo.

Esta herramienta tiene un límite de 200 variables de búsqueda (100 como máximo para variables enteras) y 100 restricciones. Esta limitación de Solver® debe ser considerada para los casos que sean resueltos bajo los dos modelos mostrados en la Tabla 4. La obtención del número de variables y ecuaciones de un caso particular dependerá de: a) tipo de problema (transporte o redes), b) número de nodos totales, nt y c) número de opciones de ubicaciones candidatas (variables binarias), para el caso en que un solo nodo presente esta condición, ni . No obstante, el tipo de problema particulariza este conteo:

- Problema de transporte: este modelo define el número de nodos productores, n_j , y nodos receptores, n_k . Así, limitándolo a un nivel de envío, es decir los nodos receptores no envían a otro nivel de nodos. La

cantidad de ecuaciones es la suma de: función objetivo (1), suma de binarias (1), conservación de las cantidades enviadas (3), conservación de las cantidades para los nodos de envío-recepción ($nj+nk$) y restricciones de cantidades candidatas ($ni \times nj$). El número de variables está dado por las cantidades de: variables de interconexión exceptuando al nodo con candidatos ($nj \times (nk-1)$) y variables desagregadas totales ($ni \times nj$). Finalmente, bajo las restricciones de Solver [®], el tamaño de los problemas de este modelo está limitado a: $3+nj+nk+nj \times ni < 100$, $ni < 100$ y $nj \times (ni+nk-1)+ni < 200$.

- Problema de redes: este modelo es distinto al anterior, ya que las redes son propuestas para cada caso. Así, cada caso debe considerar el número de interconexiones de cada nodo j , exceptuando al nodo con opciones candidatas, nc_j y el número de interconexiones del nodo con opciones candidatas, nco . La cantidad de ecuaciones es la suma de: función objetivo (1), suma de binarias (1), conservación de las cantidades de cada nodo (nt) y restricciones de cantidades candidatas para el nodo con ubicaciones candidatas ($ni \times nco$). El número de variables está dada por las cantidades de: variables de interconexión exceptuando al nodo con candidatos ($\sum_j nc_j$) y variables desagregadas totales ($ni \times nco$). Finalmente, bajo las restricciones de Solver [®], el tamaño de los problemas de este modelo está limitado a: $2+nt+ni \times nco < 100$, $ni < 100$ y $\sum_j nc_j+ni \times nco+ni < 200$.

La aplicación de las herramientas de MExcel [®] en este tema ha sido demostrado por Edgar *et al.* (2001), Chopra y Meindl (2001) y Hillier y Lieberman (2004). Estos trabajos han presentado la solución de problemas de optimización bajo una técnica de distribución de celdas en la hoja de cálculo de MExcel [®]. La estrategia consiste en la identificación de rangos de celdas característicos de variables y restricciones; estos rangos son clasificados por restricciones con las relaciones matemáticas ($=, \leq$ y \geq). En la herramienta Solver [®] de MExcel [®] es necesario definir estas relaciones, adicionando que las variables binarias conforman otro rango de celdas con la indicación "bin". La Tabla 6 contiene un caso de programación mixta entera no lineal (MINLP), el cual incluye el modelo y la distribución de celdas en MExcel [®], tal que: B es el arreglo de las variables desconocidas (celdas de búsqueda), C es el arreglo para la variables binarias y el resto de las celdas presenta una clasificación con base a la relación matemática a la que pertenece. La solución debe ser declarada como modelo no lineal y el estudiante proveería valores iniciales arbitrarios en las celdas; el resultado es: $F=1426.96$, $B_C=1$, $x_1=2.143$, $x_2=0$ y $x_3=18.857$.

Tabla 6: Ejemplo de modelo MINLP bajo distribución de celdas en MExcel [®].

Modelo MINLP	Distribución de celdas
$\min F = x_1^2 + x_2^2 + 4x_3^2$ sujeto a: $x_1^2 + x_2^2 \leq 18$ $x_3 - 6x_1 = 6$ $B_A + B_B + B_C = 1$ $x_{1,A} + x_{1,C} = x_1$ $x_{1,A} + x_{2,A} \geq 16B_A$ $x_{2,A} + x_{2,B} = x_2$ $x_{2,B} + x_{3,B} \geq 19B_B$ $x_{3,B} + x_{3,C} = x_3$ $x_{1,C} + x_{3,C} \geq 21B_C$ $x_{1,A}, x_{2,A} \leq 100B_A$ $x_{2,B}, x_{3,B} \leq 100B_B$ $x_{1,C}, x_{3,C} \leq 100B_C$ $0 \leq x_1, x_2, x_3, x_{1,A}, x_{1,C}, x_{2,A}, x_{2,B}, x_{3,B}, x_{3,C}$	$F \quad \min F = x_1^2 + x_2^2 + 4x_3^2$ <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> $x_{1,A}$ $x_{1,C}$ $x_{2,A}$ $x_{2,B}$ $x_{3,B}$ $x_{3,C}$ B_A B_B B_C $B_A + B_B + B_C$ </div> <div style="width: 30%; text-align: center;"> B </div> <div style="width: 30%;"> $\leq 100B_A$ $\leq 100B_B$ $\leq 100B_C$ </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 30%;"> $x_{1,A} + x_{1,C} = x_1$ $x_{2,A} + x_{2,B} = x_2$ $x_{3,A} + x_{3,C} = x_3$ </div> <div style="width: 30%; text-align: center;"> C </div> <div style="width: 30%;"> $\geq 16B_A$ $\geq 19B_B$ $\geq 21B_C$ </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 30%;"></div> <div style="width: 30%; text-align: center;"> ≤ 18 $= 6$ </div> <div style="width: 30%;"></div> </div>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección está conformada por los casos de estudio resueltos en diversas clases de la materia de Diseño de Plantas Alimentarias del Tecnológico Nacional de México-Roque. El desarrollo de la solución sistemática es presentado a continuación bajo dos ejemplos, uno de cada tipo de problema. Estos casos de estudio están restringidos a las características: sistema lineal determinista con parámetros de costo constantes. Estos incluyen el modelo desarrollado y la distribución de celdas. En ambos casos, los estudiantes comprendieron las propuestas

existentes en este tipo de problemas y pudieron resolver problemas de mayor complejidad. La evidencia obtenida proviene de tareas y exámenes, en los cuales los estudiantes demuestran la adquisición del conocimiento al realizar modelos sobre casos de estudios definidos.

Caso aplicado al problema de transporte

Una empresa porcicultora cuenta con una planta procesadora dentro de la zona de proveedores y almacenes de recepción. La inclusión de un nuevo proveedor y el aumento en el consumo por los clientes demandan crear una planta auxiliar. Cinco opciones de ubicación fueron propuestas. Los proveedores son cinco (incluyendo el nuevo) y tienen la siguiente producción (pza/semana): 1300 (P₁), 1600 (P₂), 2400 (P₃), 1800 (P₄) y 4400 (P₅). Las plantas adecuaron su capacidad de procesamiento a (pza/semana): 6000 (A) y 5500 (B, nueva). La Tabla 7 resume los costos de envío entre proveedores y plantas para cada opción de ubicación (1, 2, 3, 4 y 5). Defina la ubicación óptima con base al menor costo de transporte e indique las cantidades enviadas por las rutas.

Tabla 7: Costos para el problema de transporte (\$/pza).

Plantas→ Proveedores↓	A	Opciones de ubicación				
		1	2	3	4	5
P ₁	12	18	16	15	16	1
P ₂	8	20	4	2	14	10
P ₃	14	7	14	18	11	4
P ₄	10	10	10	24	5	10
P ₅	21	9	9	6	11	23

Tabla 8: Modelo matemático para el caso de estudio aplicado al problema de transporte.

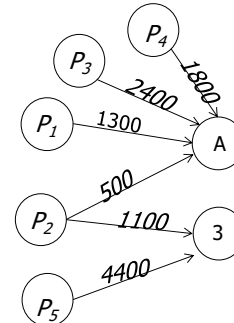
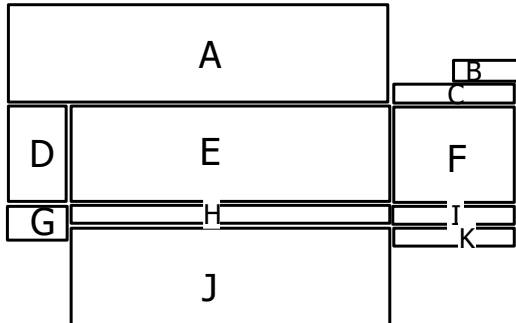
Descripción	Expresión matemática	Descripción	Expresión matemática
Conservación de materia para los nodos de proveedores y el nodo A	$P_1: X_{1,A} + XC_{1,B,1} + XC_{1,B,2} + XC_{1,B,3} + XC_{1,B,4} + XC_{1,B,5} \leq 1300$ $P_2: X_{2,A} + XC_{2,B,1} + XC_{2,B,2} + XC_{2,B,3} + XC_{2,B,4} + XC_{2,B,5} \leq 1600$ $P_3: X_{3,A} + XC_{3,B,1} + XC_{3,B,2} + XC_{3,B,3} + XC_{3,B,4} + XC_{3,B,5} \leq 2400$ $P_4: X_{4,A} + XC_{4,B,1} + XC_{4,B,2} + XC_{4,B,3} + XC_{4,B,4} + XC_{4,B,5} \leq 1800$ $P_5: X_{5,A} + XC_{5,B,1} + XC_{5,B,2} + XC_{5,B,3} + XC_{5,B,4} + XC_{5,B,5} \leq 4400$ $X_{1,A} + X_{2,A} + X_{3,A} + X_{4,A} + X_{5,A} \leq 6000$	Conservación para el nodo B	$XC_{1,B,1} + XC_{2,B,1} + XC_{3,B,1} + XC_{4,B,1} + XC_{5,B,1} +$ $XC_{1,B,2} + XC_{2,B,2} + XC_{3,B,2} + XC_{4,B,2} + XC_{5,B,2} +$ $XC_{1,B,3} + XC_{2,B,3} + XC_{3,B,3} + XC_{4,B,3} + XC_{5,B,3} +$ $XC_{1,B,4} + XC_{2,B,4} + XC_{3,B,4} + XC_{4,B,4} + XC_{5,B,4} +$ $XC_{1,B,5} + XC_{2,B,5} + XC_{3,B,5} + XC_{4,B,5} + XC_{5,B,5} \leq 5500$
Restricción para la cota superior de cantidades candidatas	$XC_{1,B,1}, XC_{2,B,1}, XC_{3,B,1}, XC_{4,B,1}, XC_{5,B,1} \leq 5500B_{B,1}$ $XC_{1,B,2}, XC_{2,B,2}, XC_{3,B,2}, XC_{4,B,2}, XC_{5,B,2} \leq 5500B_{B,2}$ $XC_{1,B,3}, XC_{2,B,3}, XC_{3,B,3}, XC_{4,B,3}, XC_{5,B,3} \leq 5500B_{B,3}$ $XC_{1,B,4}, XC_{2,B,4}, XC_{3,B,4}, XC_{4,B,4}, XC_{5,B,4} \leq 5500B_{B,4}$ $XC_{1,B,5}, XC_{2,B,5}, XC_{3,B,5}, XC_{4,B,5}, XC_{5,B,5} \leq 5500B_{B,5}$	Positividad	$X_{1,A}, X_{2,A}, X_{3,A}, X_{4,A}, X_{5,A} \geq 0$ $XC_{1,B,1}, XC_{2,B,1}, XC_{3,B,1}, XC_{4,B,1}, XC_{5,B,1} \geq 0$ $XC_{1,B,2}, XC_{2,B,2}, XC_{3,B,2}, XC_{4,B,2}, XC_{5,B,2} \geq 0$ $XC_{1,B,3}, XC_{2,B,3}, XC_{3,B,3}, XC_{4,B,3}, XC_{5,B,3} \geq 0$ $XC_{1,B,4}, XC_{2,B,4}, XC_{3,B,4}, XC_{4,B,4}, XC_{5,B,4} \geq 0$ $XC_{1,B,5}, XC_{2,B,5}, XC_{3,B,5}, XC_{4,B,5}, XC_{5,B,5} \geq 0$
Suma total	$11500 = X_{1,A} + XC_{1,B,1} + XC_{1,B,2} + XC_{1,B,3} + XC_{1,B,4} + XC_{1,B,5} + X_{2,A} + XC_{2,B,1} + XC_{2,B,2} + XC_{2,B,3} + XC_{2,B,4} + XC_{2,B,5} + X_{3,A} + XC_{3,B,1} + XC_{3,B,2} + XC_{3,B,3} + XC_{3,B,4} + XC_{3,B,5} + X_{4,A} + XC_{4,B,1} + XC_{4,B,2} + XC_{4,B,3} + XC_{4,B,4} + XC_{4,B,5} + X_{5,A} + XC_{5,B,1} + XC_{5,B,2} + XC_{5,B,3} + XC_{5,B,4} + XC_{5,B,5}$		
Binaria	$B_{B,1} + B_{B,2} + B_{B,3} + B_{B,4} + B_{B,5} = 1$		
Función Objetivo	$\min F = 12X_{1,A} + 18XC_{1,B,1} + 16XC_{1,B,2} + 15XC_{1,B,3} + 16XC_{1,B,4} + XC_{1,B,5} + 8X_{2,A} + 20XC_{2,B,1} + 4XC_{2,B,2} + 2XC_{2,B,3} + 14XC_{2,B,4} + 10XC_{2,B,5} + 14X_{3,A} + 7XC_{3,B,1} + 14XC_{3,B,2} + 18XC_{3,B,3} + 11XC_{3,B,4} + 4XC_{3,B,5} + 10X_{4,A} + 10XC_{4,B,1} + 10XC_{4,B,2} + 24XC_{4,B,3} + 5XC_{4,B,4} + 10XC_{4,B,5} + 21X_{5,A} + 9XC_{5,B,1} + 9XC_{5,B,2} + 6XC_{5,B,3} + 11XC_{5,B,4} + 23XC_{5,B,5}$		

La solución inicia con el planteamiento del modelo, siguiendo la formulación de la Tabla 4, y concluye con la solución numérica con base a la estrategia propuesta anteriormente. La Tabla 8 contiene el modelo matemático para este problema, el cual está constituido por 10 ecuaciones, 31 variables continuas y 5 variables discretas. Este modelo es lineal y debe tener la restricción de valores positivos, estas características deben ser declaradas en el diálogo de Solver ®.

La Figura 2 a) contiene la distribución del modelo en una hoja de cálculo, indicado por:

- A. Valor de la Tabla 7.
- B. Función objetivo.
- C. Suma total de las variables.
- D. Variables desconocidas no candidatas.
- E. Variables desconocidas candidatas.
- F. Conservación de materia para los nodos de proveedores.

- G. Conservación de materia para el nodo A.
- H. Variables binarias.
- I. Suma de variables binarias.
- J. Restricción de la cota superior de cantidades candidatas.
- K. Conservación de materia para el nodo B.



a)

b)

Fig.2: Solución caso de estudio aplicado al problema de transporte: a) distribución de la hoja de cálculo y b) solución gráfica obtenida.

La solución indicó la selección de la ubicación 3 con una función objetivo de 99,800\$/semana, la Figura 2b) contiene los valores finales del transporte.

Caso aplicado al problema de redes

En respuesta al aumento de huertas de naranja, una empresa procesadora de jugo de naranja concentrado ha aceptado a un nuevo proveedor de jugo fresco, por lo cual ahora tiene tres proveedores: A, B y C. La empresa cuenta con una planta concentradora con área de envasado (D) y una planta envasadora (E), las cuales no serán suficientes para satisfacer los nuevos envíos, pues cada proveedor enviará 100 t cada tres días y D solo puede recibir hasta 150 t cada tres días. Esto implica la planeación de una planta concentradora auxiliar (F), la cual puede concentrar jugo y enviarlo a las demás plantas con envasadoras. Cuatro lugares candidatos fueron propuestos para ubicar la nueva planta. La Figura 3 a) presenta la red nodal para este problema. Los costos de envío por tonelada de jugo fresco son mostrados en la Tabla 9. Si los envíos siempre serán regulares cada tres días, determine la opción óptima de ubicación de la planta, el costo total y las cantidades enviadas entre los nodos.

Tabla 9: Costos de transporte (k\$/t cada tres días) para el problema de redes.

Línea	Costo	Línea	Costo
AD	8	DE	12
AE	10	DG	10
BD	15	EG	8
CE	21		

Conexión→	BF	CF	FD	FE
Opción 1	6	8	6	14
Opción 2	9	10	8	8
Opción 3	11	6	6	11
Opción 4	8	9	9	7

La solución inicia con el planteamiento del modelo, siguiendo la formulación de la Tabla 4, y concluye con la solución numérica con base a la estrategia propuesta anteriormente. La Tabla 10 contiene el modelo matemático lineal para este problema, el cual está constituido por 26 ecuaciones y 23 variables continuas y 4 variables discretas.

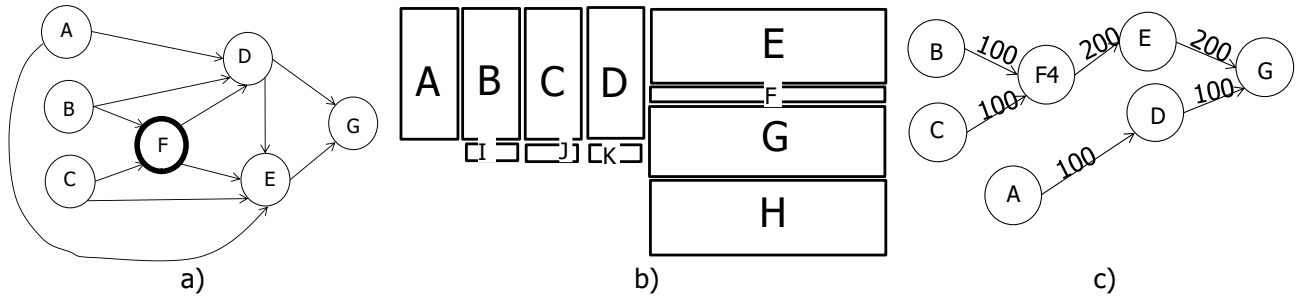


Fig. 3: Información gráfica para el caso de estudio aplicado al problema de redes: a) sistema nodal propuesto, b) distribución de la hoja de cálculo y c) solución gráfica obtenida.

Tabla 10: Modelo matemático para el caso de estudio aplicado al problema de redes.

Descripción	Expresión matemática	Descripción	Expresión matemática
Restricción para la cota superior de cantidades candidatas	$XC_{B,F,1} + XC_{C,F,1} + XC_{F,D,1} + XC_{F,E,1} \leq 300 \cdot B_{F,1}$ $XC_{B,F,2} + XC_{C,F,2} + XC_{F,D,2} + XC_{F,E,2} \leq 300 \cdot B_{F,2}$ $XC_{B,F,3} + XC_{C,F,3} + XC_{F,D,3} + XC_{F,E,3} \leq 300 \cdot B_{F,3}$ $XC_{B,F,A} + XC_{C,F,A} + XC_{F,D,A} + XC_{F,E,A} \leq 300 \cdot B_{F,4}$	Positividad	$X_{A,D} + X_{A,E} + X_{B,D} + X_{C,E} + X_{D,E} + X_{D,G} + X_{E,G} \geq 0$ $XC_{B,F,1} + XC_{C,F,1} + XC_{F,D,1} + XC_{F,E,1} \geq 0$ $XC_{B,F,2} + XC_{C,F,2} + XC_{F,D,2} + XC_{F,E,2} \geq 0$ $XC_{B,F,3} + XC_{C,F,3} + XC_{F,D,3} + XC_{F,E,3} \geq 0$ $XC_{B,F,A} + XC_{C,F,A} + XC_{F,D,A} + XC_{F,E,A} \geq 0$
Conservación de materia para los nodos	$A: X_{A,D} + X_{A,E} = 100$ $B: X_{B,D} + XC_{B,F,1} + XC_{B,F,2} + XC_{B,F,3} + XC_{B,F,A} = 100$ $C: X_{C,E} + XC_{C,F,1} + XC_{C,F,2} + XC_{C,F,3} + XC_{C,F,A} = 100$ $D: -X_{A,D} - X_{B,D} - XC_{F,D,1} - XC_{F,D,2} - XC_{F,D,3} - XC_{F,D,A} + X_{D,E} + X_{D,G} = 0$ $E: -X_{C,E} - X_{D,E} - XC_{F,E,1} - XC_{F,E,2} - XC_{F,E,3} - XC_{F,E,A} + X_{E,G} = 0$ $F: -XC_{B,F,1} - XC_{B,F,2} - XC_{B,F,3} - XC_{B,F,A} - XC_{C,F,1} - XC_{C,F,2} - XC_{C,F,3} - XC_{C,F,A}$ $+ XC_{F,D,1} + XC_{F,D,2} + XC_{F,D,3} + XC_{F,D,A} + XC_{F,E,1} + XC_{F,E,2} + XC_{F,E,3} + XC_{F,E,A} = 0$ $G: -X_{D,G} - X_{E,G} = -300$		
Restricción para nodo D	$X_{A,D} + X_{B,D} + XC_{F,D,1} + XC_{F,D,2} + XC_{F,D,3} + XC_{F,D,A} \leq 150$		
Binarias	$B_{F,1} + B_{F,2} + B_{F,3} + B_{F,4} = 1$		
Función Objetivo	$\min F = 8,000X_{A,D} + 10,000X_{A,E} + 15,000X_{B,D} + 21,000X_{C,E} + 12,000X_{D,E} + 10,000X_{D,G} + 8,000X_{E,G} +$ $6,000XC_{B,F,1} + 9,000XC_{B,F,2} + 11,000XC_{B,F,3} + 8,000XC_{B,F,A} + 8,000XC_{C,F,1} + 10,000XC_{C,F,2} + 6,000XC_{C,F,3} + 9,000XC_{C,F,A}$ $+ 6,000XC_{F,D,1} + 8,000XC_{F,D,2} + 6,000XC_{F,D,3} + 9,000XC_{F,D,A} + 14,000XC_{F,E,1} + 8,000XC_{F,E,2} + 11,000XC_{F,E,3} + 7,000XC_{F,E,A}$		

La Figura 3 b) contiene la distribución del modelo en una hoja de cálculo, indicado por:

- A. Variables desconocidas no candidatas.
- B. Costos de envío de los nodos en Tabla 9.
- C. Conservación de materia para los nodos.
- D. Valores de materia para los nodos.
- E. Variables desconocidas candidatas.
- F. Variables binarias.
- G. Restricción de la cota superior de cantidades candidatas.
- H. Valores de ubicaciones candidatas de la Tabla 9.
- I. Restricción del nodo D.
- J. Función objetivo.
- K. Suma de las variables binarias.

La solución indicó la selección de la ubicación 4 con una función objetivo de 6,500k\$/cada tres días, la Figura 3 c) contiene los valores finales para la ruta en el sistema nodal.

CONCLUSIONES

La metodología de modelar este tema ha sido descrita y su solución involucró un aspecto pedagógico asertivo. El estrategia didáctica mostrada aquí englobó fundamentos conceptuales del tema y el uso de TIC's para su solución.

De esta forma, los alumnos han demostrado un nivel aceptable de aplicación y relación del tema con elementos reales propios de la formación recibida, como lo demuestran los recientes años impartiendo el tema en la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Los casos de estudio tienen el fundamento indicado: ubicación de plantas procesadoras de alimentos basadas en el problema de transporte y de rutas. Así, pedagógicamente, el objetivo del planteamiento global del trabajo es logrado, ya que se ha presentado una metodología de planteamiento-solución válida.

NOMENCLATURA

$B_{k,i}$	variable binaria para la selección de candidatos i
BB_d	variable binaria para la selección de un elemento d
$C_{j,k}$	costo de envío por unidad de materia transportada en los nodos j y k
$CC_{i,j,k}$	costo de envío por unidad de materia de una ubicación candidata en el nodo k
D	conjunto de elementos de una disyunción
d	índice de elementos de una disyunción
F	costo total
I	conjunto de ubicaciones candidatas en cada nodo
i	índice de de ubicaciones candidatas en cada nodo
J	conjunto de nodos de envío
j	índice de nodos de envío
K	conjunto de nodos de recepción
k	índice de nodos de recepción
L_n	valor de cota inferior de la n variable desconocida
M	conjunto de funciones de una disyunción
m	índice de funciones de una disyunción
N	conjunto de variables desconocidas para una disyunción
n	índice de variables desconocidas para una disyunción
nc_j	número de interconexiones de cada nodo j , exceptuando al nodo con opciones candidatas
nco	número de interconexiones del nodo con opciones candidatas
ni	número de opciones de ubicaciones candidatas en un nodo
nj	número de nodos productores para el problema de transporte
nk	número de nodos receptores para el problema de transporte
nt	número de nodos totales del problema
P_j	capacidad límite de materia enviada desde un nodo j
P_{TOTAL}	capacidad total de envío
R_k	capacidad límite de materia recibida en un nodo k
U_n	valor de cota superior de la n variable desconocida
$u_{j,k}$	costo de envío entre los nodos j y k dado un candidato de ubicación seleccionado
$UC_{j,k,i}$	variable desagregada de $u_{j,k}$ para los candidatos i
$V_{m,d}$	valor constante de las funciones de igualdad del elemento d
$W_{m,d}$	valor constante de las funciones de desigualdad del elemento d
$X_{j,k}$	cantidad de materia transportada en los nodos j y k
$XC_{j,k,i}$	variable desagregada de $X_{j,k}$ para los candidatos i
Y_i	variable Booleana de un nodo candidato i
YY_d	variable Booleana de un elemento d de una disyunción
Z_n	variable desconocida
$ZC_{n,d}$	variable desagregada para cada elemento d de la variable Z_n

Letras griegas

$\lambda_{m,d}$	funciones de igualdad del elemento d de una disyunción
$\mu_{m,d}$	funciones de desigualdad del elemento d de una disyunción

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por PRODEP y CONACYT, México.

REFERENCIAS

- Alizadeh, M. (2009). "Facility location in supply chain." En: *Facility location: concepts, models, algorithms and case studies*, Farahani, R. Z. and Hekmatfar, M., eds., Springer-Verlag, Berlin.
- Araneda-Martínez, R.H. & Morga-Suazo, R.J. (2005). La decisión de localización en la cadena de suministro. *Revista Ingeniería Industrial*, 3(1), 57-67.
- Avittathur, B., Shah, J. & Gupta, O.K. (2005). Distribution centre location modelling for differential sales tax structure. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 191-205.
- Balas, E. (1998). Disjunctive Programming: Properties of the convex hull of feasible points. *Discrete Applied Mathematics*, 89(1-3), 3-44.
- Beamon, B.M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281-294.
- Brown, P. & Gibson, D. (1972). A Quantified Model for Facility Site Selection-Application to a Multiplant Location Problem. *AIIE Transactions*, 4(1), 1-10.
- Chopra, S. & Meindl, P. (2001). *Supply chain management: strategy, planning and operation*. Pearson, Prentice-Hall.
- Daskin, M.S., Snyder, L.V. & Berger, R.T. (2005). "Facility location in supply chain design." En: *Logistics systems: design and optimization*, Langevin, A. and Riopel, D., eds., Springer, Boston, MA.
- Díaz-Ovalle, C.O. (2021). *Diseño de plantas alimentarias*. Libro de texto realizado en año sabático 2019-2020. Derechos de autor en trámite. Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque.
- Drezner, Z. & Hamacher, H.W.(eds.) (2002). *Facility Location: Applications and Theory*. Springer, Berlin.
- Edgar, T.F., Himmelblau, D.M. & Lasdon, L.S. (2001). *Optimization of chemical processes*. McGraw-Hill, Inc.
- Floudas, C.A. (1995). *Nonlinear and Mixed-Integer Optimization. Fundamentals and applications*. Oxford University Press
- Francis, R.L., Lowe, T.J. & Rayco, M.B. (1996). Row-Column Aggregation for Rectilinear Distance p-Median Problems. *Transportation Science*, 30(2), 160-174.
- Friedrich, C.J. (1929). *Alfred Weber's theory of the location of industries*. The University of Chicago Press.
- Geoffrion, A.M. & Graves, G.W. (1974). Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. *Management Science*, 20(5), 822-844.
- Hale, T.S. & Moberg, C.R. (2003). Location Science Research: A Review. *Annals of Operations Research*, 123(1), 21-35.
- Hillier, F.S. & Lieberman, G.J. (2004). *Investigación de operaciones*. McGraw-Hill.

- Johnson, M.E. & Pyke, D.F. (2000). A framework for teaching supply chain management. *Production and Operations Management*, 9(1), 2-18.
- Klose, A. & Drexel, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 4-29.
- Lee, S. & Grossmann, I.E. (2000). New algorithms for nonlinear generalized disjunctive programming. *Computers & Chemical Engineering*, 24(9-10), 2125-2141.
- Lee, S. & Grossmann, I.E. (2003). Global optimization of nonlinear generalized disjunctive programming with bilinear equality constraints: applications to process networks. *Computers & Chemical Engineering*, 27(11), 1557-1575.
- Levén, E. & Segerstedt, A. (2004). Polarica's wild berries: an example of a required storage capacity calculation and where to locate this inventory. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(3), 213-218.
- Melo, M.T., Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2007). *Facility Location and Supply Chain Management – A comprehensive review*. Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik -ITWM. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Facility_Location_and_Supply_Chain_Management_-_A_.pdf
- Melo, M.T., Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M. & Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377-390.
- Perea-Muñoz, L., Herrero, V. & Clausse, A. (2013). Modelo de demanda para simuladores interactivos de cadenas de suministro. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 5(9), 320-336.
- Perl, J. & Daskin, M.S. (1985). A warehouse location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 19(5), 381-396.
- Pooley, J. (1994). Integrated Production and Distribution Facility Planning at Ault Foods. *Interfaces*, 24(4), 113-121.
- Reyes-Palacio, S. & Gutiérrez-Quintero, S. (2019). *Desarrollo de una actividad lúdica para la enseñanza de manejo de inventarios en cadenas de suministros basado en una herramienta ERP*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/45524/u827636.pdf?sequence=1&isAllowe d=y>
- Sanabria-Coronado, L. A., Peralta-Lozano, A. M. & Orjuela-Castro, J. A. (2017). Modelos de localización para cadenas agroalimentarias percederas: una revisión al estado del arte. *Revista Ingeniería*, 22(1), 23-45.
- Santamaría-Peraza, R. (2012). La cadena de suministro en el perfil del ingeniero industrial: una aproximación al estado del arte. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 3(8), 39-50.
- Sawaya, N.W. & Grossmann, I.E. (2005). A cutting plane method for solving linear generalized disjunctive programming problems. *Computers & Chemical Engineering*, 29(9), 1891-1913.
- Soto-Silva, W.E., González-Araya, M.C., Plá-Aranogés, L.M. & Nadal-Roig, E. (2016). Transport planning in processing plants for the fruit industry. *Proceedings of 5th the International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES 2016)*, 71-78.
- Sweeney, D., Campbell, J. & Mundy, R. (2010). Teaching supply chain and logistics management through commercial software. *The International Journal of Logistics Management*, 21(2), 293-308.

Türkay, M. & Grossmann, I.E. (1996). Logic-based MINLP algorithms for the optimal synthesis of process networks. *Computers & Chemical Engineering*, 20(8), 959-978.

Tüshaus, U. & Wittmann, S. (1998). "Strategic logistic planning by means of simple plant location: a case study." En: *Advances in distribution logistics*, Fleischmann, B., van Neunen, J. A. E. E., Speranza, M. G., and Stähly, P., eds., Springer-Verlag, 241-263.

Vecchietti, A. & Grossmann, I.E. (2000). Modeling issues and implementation of language for disjunctive programming. *Computers & Chemical Engineering*, 24(9-10), 2143-2155.

Wouda, F.H.E., van Beek, P., van der Vorst, J.G.A.J. & Tacke, H. (2002). An application of mixed-integer linear programming models on the redesign of the supply network of Nutricia Dairy & Drinks Group in Hungary. *OR Spectrum*, 24(4), 449-465.

