MODELO MATEMÁTICO PARA LA CONFIGURACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO REVERSAS DE ENVASES DE FITOSANITARIOS

Alassia Emanuel

Facultad de Ingeniería Química
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química INTEC-UNL-CONICET

Directora: Henning Gabriela

Área: Ingeniería

INTRODUCCIÓN

Se entiende por logística reversa al proceso de planificación, implementación y control del eficiente flujo de materiales, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada, desde el punto de consumo hasta el punto de origen, con el propósito de volver a capturar valor o efectuar una disposición adecuada (Dekker y colab., 2004). La cadena de suministros reversa de envases de fitosanitarios tiene como finalidad recolectar y limpiar tal material, luego de que han sido vaciados, con el objetivo de minimizar los riesgos ambientales y de salud asociados y valorizar el plástico. El problema de configuración de dicha cadena implica definir: (i) el número y ubicación de los centros de almacenamiento transitorio (CAT), que son puntos intermedios de acopio de recipientes, así como de las plantas de tratamiento de envases, (ii) determinar las capacidades de las facilidades, y (iii) establecer de qué manera se llevará a cabo el flujo de materiales entre los establecimientos agrícolas, que generan losrecipientes, y los puntos de acopio/tratamiento. En este sistema, los CAT minimizan los riesgos asociados a la manipulación de los envases y permiten enviarlos a plantas de tratamiento de forma consolidada, reduciendo los costos de transporte. En dichas plantas resulta prioritario tratar el agua utilizada en las operaciones de lavado y derivar los residuos generados a sitios en donde se realice su disposición final.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es reportar un modelo matemático de toma de decisión para soportar el diseño de cadenas de suministro reversas, de envases de fitosanitarios y los resultados de su aplicación a distintos casos de estudio que posibilitan verificar la bondad del modelo.

Título del proyecto: "Nuevos Materiales Poliméricos y Nuevas Tecnologías Sustentables Basados en el Uso de Fuentes Renovables Provenientes de la Región Centro"
Instrumento: Proyectos de Unidades Ejecutoras CONICET
Año convocatoria: 2016
Organismo financiador: CONICET
Director/a: Gabriela P. Henning.

METODOLOGÍA

El enfoque de modelado más extendido para los problemas de diseño de redes logísticas es la programación matemática mixta entera lineal (MILP) (Dekker y colab., 2004). Se propone un modelo MILP de tipo multiperiodo, cuya función objetivo apunta a minimizar la inversión necesaria para la instalación de las facilidades y los costos operativos asociados al sistema. Tomando como datos las ubicaciones de las instalaciones existentes y de las posibles nuevas facilidades, el modelo determina cuáles emplazar, si correspondiese, cuáles deberán ser operadas y en qué momento, a efectos de atender los perfiles de generación de envases de cada período. El modelo también establece los flujos de materiales de la red logística en cada periodo.

Formulación matemática

Los establecimientos agrícolas, depósitos y plantas de lavado son representados por los conjuntos I, J y K, respectivamente. Asimismo, los periodos se representan por el conjunto P. Las principales variables son: (i) Q_{ijp}: Cantidad de material transportado entre el establecimiento agrícola i y el CAT j, en el periodo p. Q_{ikp}: Cantidad de material transportado entre el establecimiento agrícola i y la planta de tratamiento k, en el periodo p. Q_{jkp}: Cantidad de material transportado entre el CAT j y la planta de tratamiento k, en el periodo p. (ii) I_{jp}: Decisión de instalación del CAT j en el periodo p. I_{kp}: Decisión de instalación de la planta de tratamiento k en el periodo p. (iii) Y_{jp}: Decisión de operación del CAT j en el periodo p. Y_{jp}: Decisión de operación de la planta de tratamiento k en el periodo p.

La expresión (1) establece que los recipientes generados por cada establecimiento agrícola deben ser recolectados en el mismo período en el que fueron utilizados. La restricción (2) fuerza a que todos los envases acopiados sean enviados a plantas de tratamiento en el mismo período en el que se recolectaron. Las expresiones (3) a (6) limitan la gestión de recipientes de cada periodo sólo a aquellas facilidades que operen en los mismos. Específicamente, las dos primeras corresponden a la operación de los centros de acopio, en tanto las últimas hacen lo propio con las plantas de lavado. Las restricciones (3) y (5) se asocian a facilidades existentes, cuya capacidad operativa máxima es conocida. Las restricciones (4) y (6) se vinculan a facilidades potenciales, cuyo volumen de operación es determinado por el modelo. La restricción (7) establece el rango de operación r del centro de acopio j a instalar. Las expresiones (8) y (9) relacionan las decisiones de instalación y operación de los potenciales CAT y plantas de lavado, respectivamente. Éstas tienen en cuenta los periodos necesarios para la puesta en marcha de las facilidades. Las variables de operación son nulas en periodos menores o iguales a los de puesta en marcha. La expresión (10) establece que cada CAT puede ser instalado en un único periodo; asimismo, la ecuación (11) fija un rango operativo para aquéllos que sean emplazados. El costo de instalación de estas facilidades se determina mediante una aproximación lineal de la curva típica de economías de escala. La expresión (12) estipula parte del costo de instalación de cada CAT en función de su rango de operación. Las restricciones (13) y (14) establecen el costo adicional de instalación de los depósitos. La primera determina la cantidad de recipientes sobre la cual se sustenta tal aproximación lineal. La expresión (14) cuantifica el costo adicional de emplazamiento comentado.

$$\sum_j Q_{ijp} + \sum_k Q_{ikp} \geq G_{ip} \quad \forall\, i \in I,\ \forall\, p \in P \tag{1}$$

$$\sum_k Q_{jkp} \geq \sum_i Q_{ijp} \quad \forall\, j \in J, \forall\, p \in P \tag{2}$$

$$\sum_i Q_{ijp} \leq Capmax_j * Y_{jp} \quad \forall\, j \in J^e, \forall\, p \in P \tag{3}$$

$$\sum_i Q_{ijp} \leq M * Y_{jp} \quad \forall\, j \in J^n, \forall\, p \in P \tag{4}$$

$$\sum_i Q_{ikp} + \sum_j Q_{jkp} \leq Capmax_k * Y_{kp} \quad \forall\, k \in K^e, \forall\, p \in P \tag{5}$$

$$\sum_i Q_{ikp} + \sum_j Q_{jkp} \leq M * Y_{kp} \quad \forall\, k \in K^n, \forall\, p \in P \tag{6}$$

$$\sum_i Q_{ijp} \leq \sum_r Qmax_{jr} * X_{jr} \quad \forall\, j \in J^n, \forall\, p \in P \tag{7}$$

$$I_{jp\text{-}pcat} \geq Y_{jp} - \sum_{pp<p} Y_{jpp} \quad \forall\, j \in J^n, \forall\, p \in P,\ p > pcat \tag{8}$$

$$\sum_{pp \leq p\text{-}ppt} I_{jpp} \geq Y_{kp} \quad \forall\, k \in K^n, \forall\, p \in P,\ p > ppt \tag{9}$$

$$\sum_p I_{jp} \leq 1 \quad \forall\, j \in J^n \tag{10}$$

$$\sum_p I_{jp} = \sum_r X_{jr} \quad \forall\, j \in J^n \tag{11}$$

$$CMI_{jp} \geq \sum_r CRI_{jr} * (I_{jp} + X_{jr} - 1) \quad \forall\, j \in J^n, \forall\, p \in P \tag{12}$$

$$QA_j \geq \sum_i Q_{ijp} - \sum_r Qmin_{jr} * X_{jr} \quad \forall\, j \in J^n, \forall\, p \in P \tag{13}$$

$$CAI_{jp} \geq CC_{jr} * QA_j - M * (2 - I_{jp} - X_{jr}) \quad \forall\, j \in J^n, \forall\, p \in P, \forall\, r \in R \tag{14}$$

La función objetivo del modelo contempla la minimización de los costos totales del sistema logístico en el horizonte de planeación y se encuentra definida según la expresión (15).

$$\begin{aligned} \text{Min CTD} = \sum_p \Big(\big(\sum_{k \in K^n} CI_k * I_{kp} + \sum_{j \in J^n} (CMI_{jp} + CAI_{jp}) + \sum_k CF_k * Y_{kp} + \sum_j CF_j * Y_{jp} \\ + \sum_k \sum_i (TMR * d_{ik} * Q_{ikp} + TVR * 2 * d_{ik} * V_{ip} * Q_{ikp} / G_{ip}) \\ + \sum_j \sum_i (TMR * d_{ij} * Q_{ijp} + TVR * 2 * d_{ij} * V_{ip} * Q_{ijp} / G_{ip}) \\ + \sum_k \sum_j (TMNR * d_{jk} * Q_{jkp} + TVNR * 2 * d_{jk} * Q_{jkp} / CargaNR) \\ + \sum_k TMDF * ddf_k * (\sum_i Q_{ikp} + \sum_j Q_{jkp}) * \varphi \big) / (1 + \alpha_p) \Big) \end{aligned} \tag{15}$$

Los dos primeros términos representan los costos de instalación de plantas de tratamiento y centros de acopio, respectivamente. El tercer y cuarto término corresponden a los costos fijos de operación de las plantas de lavado y de los depósitos, respectivamente. El quinto y sexto término conciernen a los costos de recolección de envases en los tramos rurales, vinculados con las plantas de lavado y los CAT, respectivamente. Cada uno posee dos componentes: la primera comprende el costo de transporte de material propiamente dicho, el cual considera el volumen de material a transportar, la distancia y la tasa de transporte asociada. La segunda se vincula con los kilómetros recorridos por los vehículos de recolección. Para esto se contemplan: (i) Los recorridos reales efectuados por los vehículos, representados por el doble de la distancia existente entre cada par de nodos. (ii) El número de veces que cada trayecto es recorrido, estimados a partir del número de viajes necesarios para atender los requerimientos del establecimiento agrícola que se analiza, el cual es parámetro de entrada. (iii) El costo unitario de transporte rural. La séptima sumatoria expresa los costos de transporte en trayectos no rurales. Estos son calculados de forma análoga a los explicados previamente. El número de viajes realizados entre depósitos y plantas de tratamiento se estima como el cociente de los envases transportados entre cada par de facilidades y la capacidad de carga de los vehículos utilizados. En estos tramos se aplican tasas de transporte no rurales. La octava sumatoria contempla los costos logísticos de enviar los desechos generados en las plantas de tratamiento a disposición final. Estos se componen del producto de la cantidad de material tratado, la tasa de generación de residuos del proceso de lavado, las distancias asociadas y la tasa de transporte de residuos peligrosos. Finalmente, el denominador representa la tasa de interés que descuenta los flujos monetarios, a fin de considerar los costos financieros del capital.

RESULTADOS

En el presente trabajo se tomó como caso de estudio una posible cadena de suministros reversa de envases de glifosato en la región noreste de la provincia de Santa Fe, Argentina. Se consideró un horizonte de planeación de 10 periodos anuales y una generación de envases promedio de 60000 recipientes por año, en una superficie de sembrado cercana a 300000 ha. El modelo propuesto fue implementado en lenguaje GAMS (GAMS, 2018). Se recurrió al solver CPLEX. Con el objetivo de evaluar la escalabilidad del modelo, se resolvieron tres escenarios de distinta dimensionalidad, dedicando en cada caso un tiempo de CPU de 3600 segundos. La Tabla 1 brinda un resumen de los escenarios analizados y las soluciones obtenidas.

Tabla 1. Resumen de características y resolución de escenarios.

Escenario	**1**	**2**	**3**
Cardinalidad de los conjuntos I/J/K	100/20/8	100/25/10	130/30/12
Variables Continuas/ Binarias	30300/340	38375/425	59250/510
Restricciones	2980	3480	4280
Nº CAT/ Plantas de tratamiento instaladas	3/1	3/1	2/1
CTD (MM USD)/ GAP(%)	1.192/6.9	1.222/9.6	1.223/9.8
Tiempo de CPU para hallar la primera Sol. Factible (	0.42	0.52	0.73

El resultado de los dos primeros escenarios fue una red logística conformada por una planta de tratamiento y 3 CAT. Todas las instalaciones fueron emplazadas en el primer periodo del horizonte de planeación. Además, las cuatro facilidades operaron en los restantes periodos, y la utilización prevista promedio de los depósitos fue del 99%.

CONCLUSIONES

Resulta importante diseñar en forma apropiada una red logística de este tipo. De otro modo, su operación podría ser ineficiente en términos económicos y de generación de huella de carbono, a causa de las largas distancias que deben ser recorridas en las operaciones de recolección.
A pesar del elevado número de variables de decisión y sus complejas interacciones, pudieron resolverse de manera exitosa diferentes escenarios de tamaño mediano-grande, obteniéndose soluciones de buena calidad, sin requerimientos computacionales excesivos.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Dekker R., **Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove L.**, 2004.Reverse Logistics Quantitative models for closed-loop supply chains. Springer Verlag, Berlin.
GAMS, A User's Guide. https://www.gams.com/latest/docs/UG_MAIN.html. Accedido 03/11/2018.