

Estrategia de centros de consolidación para la distribución de tuna en México

Rafael Granillo Macías^{1§}
Isidro Jesús González Hernández^{1, 2}
Francisca Santana Robles¹
José Luis Martínez Flores²

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-Escuela Superior de Ciudad Sahagún. Carretera Otumba-Ciudad Sahagún S/N, zona industrial, Ciudad Sahagún, Hidalgo. CP. 43998. (profe.7739@uaeh.edu.mx).

²Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Calle 21 sur núm. 1103, col. Santiago, Puebla, Puebla. CP. 72410. (isidrojesus.gonzalez@upaep.edu.mx; joseluis.martinez01@upaep.mx).

§Autor para correspondencia: rafaelgm@uaeh.edu.mx.

Resumen

El cultivo de la tuna (*Opuntia* spp.) ha posicionado a México como líder mundial en producción de este producto agroalimentario. Debido a que la cosecha se envía a diferentes mercados a lo largo del país, las operaciones de distribución y comercialización representan un reto en esta cadena de suministro. Esta investigación se realizó con base en la producción nacional obtenida en 2016, con el objetivo de desarrollar una red de distribución que maximice las ganancias de los productores. La hipótesis fue que con base en una estrategia de centros de consolidación es posible diseñar un modelo para una red de distribución que seleccione las rutas óptimas a partir de los costos de transporte y los precios de venta en los mercados demandantes. Se utilizó programación lineal entera mixta con variables continuas para determinar las cantidades de productos a enviar y variables enteras para seleccionar los centros de consolidación. El modelo propuesto se implementó; a través, de un algoritmo programado en Matlab el cual aplica técnicas de optimización matemática para evaluar la mejor solución factible. Los resultados indican que se deben utilizar cuatro centros de consolidación en el estado de Guanajuato, diez en Zacatecas, uno en Hidalgo y Puebla respectivamente, dos en el Estado de México y seis en San Luis Potosí. Con esta propuesta, el estado de Zacatecas concentra por lo menos 50% de la cosecha, por lo que esta ubicación es clave para optimizar la ganancia en la cadena de suministro de la tuna.

Palabras clave: *Opuntia* spp., centros de consolidación, optimización, programación lineal entera mixta, red logística.

Recibido: diciembre de 2018

Aceptado: enero de 2019

Introducción

Como líder mundial en la producción de tuna (*opuntia spp.*), México cuenta con 20 000 productores los cuales cosechan anualmente en promedio 352 000 t en 48 000 ha disponibles para la siembra (SIAP, 2017). Los principales productores a nivel nacional son Estado de México, Zacatecas, Puebla e Hidalgo, seguidos por los estados de San Luis Potosí y Guanajuato (México Produce, 2016). El comportamiento de la producción de tuna durante el periodo 2007-2016 según datos de SIAP (2017) muestra ligeras variaciones con un valor acumulado en miles de pesos de 12 704 617. De los cuatro estados principales el de menor producción es Hidalgo y el que se mantiene con mayor producción durante el periodo estudiado es el Estado de México. El estado de Puebla es el que ha logrado el mayor rendimiento por hectárea sembrada durante el mismo periodo, sólo a excepción de los años 2009 y 2010 cuyo estado con mayor rendimiento fue Durango.

La producción nacional de la tuna se encuentra generalmente dispersa en diversos climas y terrenos con superficies promedio por productor de cinco hectáreas, siendo el Estado de México y Zacatecas los que aportan aproximadamente 64.4% de la superficie total disponible para la siembra.

Uno de los retos en las operaciones poscosecha es la distribución y comercialización, los cuales son procesos fundamentales que afecta la rentabilidad en el sector agroindustrial de la tuna en México (Pinedo-Espinoza *et al.*, 2010; Ramírez *et al.*, 2015), donde participan principalmente productores de la zona centro del país quienes abastecen a los diferentes mercados a nivel nacional (Ayllon *et al.*, 2015). En el proceso de comercialización influye que 90% de la producción se concentre en un periodo corto de tiempo, que corresponde al ciclo de cosecha de la tuna. Además, existe una fuerte competencia con otras frutas de temporada que se cosechan en el mismo periodo como la uva, mango o guayaba (Barrera *et al.*, 2011).

El carácter perecedero de este producto con vida post cosecha que varía entre nueve y quince días ocasiona que el tiempo y la distancia recorrida para entregar el producto al cliente sean factores que repercuten directamente en el precio de venta. Debido a estas condiciones de decaimiento en la calidad y a la propia estacionalidad con la que se produce principalmente en los meses de junio a noviembre esta cadena de suministro incluye demasiados intermediarios para la distribución, lo que resulta en precios bajos para los productores y precios altos al consumidor (Ramírez *et al.*, 2015). La producción en esta cadena se realiza generalmente en redes complejas caracterizada por desarrollarse en uno o dos niveles de distribución; es decir, desde productor hacia el mercado o a través de algún intermediario.

Las decisiones estratégicas para la ubicación de centros de almacenaje y distribución se vuelven de gran relevancia para el diseño de la cadena de suministro de productos perecederos (Sanabria *et al.*, 2017), especialmente por la dificultad para modelar las diferentes variables que intervienen a lo largo de la cadena.

Los problemas en el diseño de redes de distribución de productos perecederos generalmente se basan en determinar el número de ubicaciones de la materia prima, las plantas donde se procesa y los almacenes en donde se mantendrá el inventario, además de seleccionar los canales de comercialización entre los proveedores y clientes (Granillo-Macías *et al.*, 2017).

Una estrategia para mejorar la distribución y la comercialización es recurrir a centros de consolidación, como una alternativa de bajo costo que permite de forma cooperativa consolidar la cosecha de diferentes productores y posteriormente distribuirla en los mercados demandantes (Reina y Cortes, 2015). Un centro de consolidación se define como una ubicación geográfica la cual se utiliza para transferir productos entre diferentes orígenes y destinos. Los objetivos principales de un centro de consolidación son extender la cobertura de una red de distribución, mejorar el desempeño de la operación de abastecimiento y reducir los costos de transportación (Hamidi *et al.*, 2014). En los sistemas logísticos de distribución un centro de consolidación es usado principalmente cuando los flujos de productos provienen de múltiples proveedores (Figura 1).

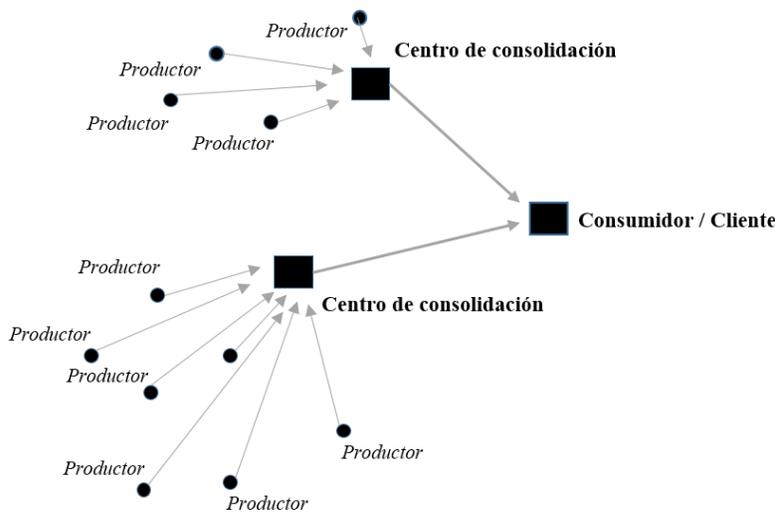


Figura 1. Representación gráfica de centros de consolidación.

La adecuada configuración y asignación de flujos en el diseño de una red basada en centros de consolidación permite reducir el tiempo de traslado y el costo de mantener el inventario en la cadena de suministro (Agustina *et al.*, 2014), siendo especialmente útil en la distribución de grandes volúmenes de productos los cuales se transportan entre diferentes puntos de origen y destino (Ghaffari-Nasab *et al.*, 2015).

Kreng y Chen (2008) desarrollan dos modelos para coordinar tanto la producción como la distribución para reducir los costos más relevantes en una cadena de suministro. Evalúan dos estrategias, una de centros de consolidación y otra de almacenamiento tradicional, los investigadores concluyen que la primera estrategia permite grandes ahorros en los costos totales. Estos autores realizan dos principales contribuciones, la primera es con respecto a ampliar las aplicaciones de centros de consolidación donde incorporan un estudio combinatorio, la segunda se refiere a la evaluación del rendimiento computacional con la estrategia de centros de consolidación.

Küçükoğlu y Öztürk (2017) implementan un modelo de programación lineal entera mixta en dos etapas para un problema de transporte, para diseñan una red de distribución basado en centros de consolidación, que minimiza los costos de transporte desde los proveedores hasta los clientes, considera también los planes de carga de camiones entrantes y salientes y las asignaciones de productos en el área de consolidación con respecto a las restricciones físicas dimensionales.

Vasiljevic *et al.* (2013) señalan que al implementar centros de consolidación en la agricultura es posible mejorar la distribución de los productos e incrementar la competitividad no solo en una compañía sino en toda la cadena de suministro.

El objetivo de este estudio fue desarrollar una red de distribución para la cadena de suministro de la tuna mediante un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) que maximice las ganancias de los productores.

La hipótesis fue que con base en una estrategia de centros de consolidación es posible diseñar una red de distribución que seleccione las rutas óptimas al considerar los costos logísticos del transporte y los precios de venta en los mercados demandantes.

Materiales y métodos

Una herramienta para la planeación en las operaciones de distribución y transporte son las técnicas de optimización matemática, las cuales se formulan con base en una función objetivo y restricciones enfocadas principalmente en reducir los costos y tiempo (Badole *et al.*, 2012). Algunas de estas técnicas incluyen la programación lineal y no lineal dependiendo de la naturaleza del problema de estudio. En esta propuesta se utilizó la programación lineal entera mixta la cual utiliza variables continuas para determinar las cantidades de productos a enviar y variables de tipo enteras (entre 0 y 1) para seleccionar los centros de consolidación que deberán ser utilizados con el objetivo de optimizar la red de distribución.

Para el modelado se aplicaron técnicas de optimización como: ‘ramificación y acotamiento’, la cual utiliza un método basado en dividir la solución factible en pequeños subconjuntos de soluciones para evaluar de manera sistemáticamente la mejor solución encontrada; también se utilizó la optimización matemática ‘plano de corte’ la cual es una técnica que permite iterativamente refinar el conjunto de soluciones factibles, que es ampliamente utilizada para encontrar una solución entera en problemas de programación lineal.

El software seleccionado para la implementación del modelado fue Matlab el cual utiliza algoritmos basados en programación matemática para localizar parámetros que minimicen o maximicen una función objetivo bajo ciertas restricciones. Como interfaz entre la base de datos utilizada y Matlab se utilizó el software de Microsoft Excel.

Formulación del modelo

El modelo MILP propuesto tiene como función objetivo el determinar la red de distribución que maximice la ganancia de los productores. En este caso se considera la estrategia de centros de consolidación por lo que la función objetivo queda expresada como.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_k X_{jk} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jk} - \sum_{j \in J} f_j Y_j \quad 1)$$

En la función objetivo (1), $i \in I$ representa el conjunto de productores de tuna ubicados en los estados productores de Puebla, Zacatecas, San Luis Potosí, Estado de México, Hidalgo y Guanajuato, $j \in J$ representa el conjunto de centros de consolidación disponible y $k \in K$ representa el conjunto de mercados consumidores. Las variables de decisión X_{ij} , X_{jk} indican la cantidad en toneladas a transportar desde el productor i hacia el centro de consolidación j , del centro de consolidación j hacia el mercado k . Además, Y_j es una variable binaria que indica qué centros de consolidación deben ser utilizados y cuáles no con el propósito de optimizar la red de distribución. Los parámetros C_{ij} , C_{jk} en (1) incorporan los costos de transporte (\$/tonelada) desde el productor i hacia el centro de consolidación j y desde centro de consolidación j hacia el mercado k y por último P_k y f_j indican el precio de venta en el mercado k y el costo fijo de apertura del centro de consolidación j respectivamente.

En cuanto a las restricciones para este modelo, la expresión (2) indica que la cantidad enviada desde el centro de consolidación j hacia el mercado k debe de cubrir por lo menos la demanda en k .

$$\sum_{j \in J} X_{jk} \geq dem_k \quad \forall k \in K \quad 2)$$

La restricción (3) garantiza que la producción de tuna que se envía del productor i al centro de consolidación j no sea mayor a la cosecha disponible en i .

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq sum_i \quad \forall i \in I \quad 3)$$

Las restricciones (4) y (5) relacionan la cantidad enviada X_{ij} y X_{jk} con la capacidad disponible en el centro de consolidación j .

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq cap_j \quad \forall j \in J \quad 4)$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq Y_j \cdot cap_j \quad \forall j \in J \quad 5)$$

El flujo (entradas-salidas) en el centro de consolidación se expresa en (6) como una ecuación de balance.

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = \sum_{k \in K} X_{jk} \quad \forall j \in J \quad 6)$$

Finalmente (7) garantizan la no negatividad de las variables y el tipo de cada una.

$$x_{ij} \geq 0; x_{jk} \geq 0; Y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad 7)$$

Implementación del modelo

Los mayores volúmenes de producción de tuna en el 2016 de acuerdo a SIAP (2017) se concentraron en Zacatecas, Estado de México, Puebla, San Luis Potosí, Guanajuato e Hidalgo (Cuadro 1).

Para determinar los volúmenes de producción disponible de los estados ofertantes (orígenes) y las cantidades que solicitan los estados demandantes (destinos) se utilizó la metodología propuesta por Ayllon *et al.* (2015).

Cuadro 1. Producción de tuna.

Estado	Municipios productores	Producción (t)
Guanajuato	7	22 577
Hidalgo	31	21 337
México	9	190 530
Puebla	22	100 866
San Luis Potosí	23	15 138
Zacatecas	21	94 092

Datos de SIAP (2017).

Los centros de consolidación presentan la particularidad de que su uso no está restringido a una cadena de suministro en particular, sino que más bien sirve para una amplia variedad de productos que se puedan distribuir a través de esta red que conecta el suministro (productores) con la demanda (clientes). Considerando esta particularidad, los centros de consolidación se seleccionaron con base en la infraestructura disponible de almacenes y centros de acopio a nivel nacional según datos de ASERCA (2017). En total se localizaron 53 posibles ubicaciones (Cuadro 2) las cuales poseen las mayores capacidades de almacenamiento disponible por Estado.

Cuadro 2. Ubicaciones seleccionadas.

Estado	Centros de consolidación	Capacidad total (t)
Guanajuato	10	324 000
Hidalgo	7	76 825
México	9	237 662
Puebla	10	120 356
San Luis Potosí	7	73 200
Zacatecas	10	162 020

Datos de ASERCA (2017).

Al considerar que la función objetivo busca maximizar la ganancia de los productores, se consultó la base de datos del Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM, 2017) con el propósito de identificar el comportamiento de los precios de la tuna que se comercializan en los diferentes estados demandantes. En conjunto se seleccionaron 27 mercados potenciales para la distribución de la tuna ubicados en las ciudades de Aguascalientes, Tijuana, Campeche, Torreón,

Colima, Tuxtla Gutiérrez, Ciudad de México, Tapachula, León, Celaya, Irapuato, Guadalajara, Morelia, Cuautla, Tepic, Monterrey, Oaxaca, Querétaro, Chetumal, Cancún, Reynosa, Jalapa, Minatitlán, Veracruz y Mérida.

Para el cálculo de las distancias de traslado entre los productores, centros de consolidación y mercados demandantes seleccionados se utilizó la interfaz de programación de aplicaciones Google Matriz Distance, la cual permite obtener de forma confiable la distancia entre ubicaciones (Fahui y Yanqing, 2011). Esta herramienta calcula la ruta óptima para el transporte a partir de la infraestructura de caminos disponibles, el mejor tiempo de recorrido entre un conjunto de orígenes y un conjunto de destinos.

El transporte es un componente importante de las operaciones de la cadena de suministro y la logística ya que tiene como fin cumplir con las restricciones de tiempo y satisfacer las demandas los clientes en las fechas acordadas, evitando demoras y minimizando los gastos de transporte de mercancías o productos. Además, la distancia es otra dimensión importante en el transporte de carga. El costo del servicio del transporte de productos varía según la distancia a la que se debe transferir la carga.

Esto es razonable porque la cantidad de combustible usado depende de la distancia y la cantidad de trabajo es una función de la distancia. Tsao y Lu (2012) mencionan que, cuanto mayor sea la distancia para transferir los productos, menor será el costo del transporte por kilómetro recorrido, además explican que una forma fácil de calcular el costo de transportación es considerando un costo fijo y un costo variable adicional que se debe pagar por unidad (km) de distancia recorrida. Sin embargo, existen otros factores o componentes a parte de los costos fijos y distancia recorrida que se deben tomar en cuenta para determinar el precio del servicio del transporte de carga.

Por ejemplo, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México presentó una metodología convencional para generar índices de precios; es decir, identificó los insumos que utilizan los transportistas para producir el servicio y establecer el costo del servicio (Moreno, 2014). Por otra parte, Hajghasema y Abbas (2016) mencionan que los costos de transporte son una parte principal de los costos logísticos, por lo tanto, se ve reflejado en los costos finales de los productos, los autores explican que alrededor de 5% a 6% del precio de los productos corresponde a los costos de transporte. En algunos productos como los alimentos, esto se eleva hasta 30%.

Para calcular los costos logísticos del transporte en nuestro caso de estudio, nos basamos en el enfoque de Tsao y Lu (2012) donde sólo se consideran costos fijos y un costo adicional que se debe pagar por cada kilómetro recorrido, además se consideró la metodología de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte para estimar los costos del transporte que fueron establecidos en este estudio. En el Cuadro 3. se presentan los costos logísticos en los que se incurre al transportar una tonelada de tuna desde un productor a un centro de consolidación.

Cuadro 3. Costos logísticos del transporte.

Carga	Distancia	Costo fijo	Costo por tonelada	Costo x km adicional recorrido (después de los 30 km)
1 < t < 28	1 < km < 30	\$0.00	\$575.00	\$25.00
29 < t < T	1 < km < 30	\$3 500.00	\$575.00	\$20.00

Para el caso de los costos logísticos de transporte desde un centro de consolidación a un mercado se consideró únicamente la opción que agrega el costo fijo de \$3 500.00. Para el desarrollo de este modelo se asumen también que.

La producción de tuna que se obtiene en la cosecha por los diferentes productores localizados en los estados ofertantes se consume totalmente por los mercados demandantes, al ser considerados como los únicos clientes potenciales. Los centros de consolidación funcionan como puntos de reunión de la cosecha obtenida y de igual forma como almacenes temporales de los productores, por lo que al seleccionar un centro existirá un costo fijo de apertura y de operación asociado.

Las pérdidas asociadas por el manejo poscosecha dentro de las operaciones de transporte se consideran mínimas. En el transporte se asume que tiene la capacidad suficiente para el traslado de la tuna. Los costos de transporte de un centro de consolidación hacia un mercado son menores debido a la posibilidad de utilizar transportes con mayor capacidad lo que reduce el costo por tonelada enviada.

Resultados y discusión

Para encontrar una solución factible, el modelo de programación lineal entera mixta se resolvió mediante codificación en el software Matlab usando un algoritmo el cual aplica los métodos cuantitativos de ramificación y acotamiento, plano de corte y heurísticas. La programación se realizó mediante un algoritmo que obtiene información de bases de datos en Microsoft Excel y posteriormente son procesados mediante arreglos matriciales. El solucionador de Matlab utilizado en este caso fue 'intlinprog' el cual se basa en la programación lineal entera mixta. El modelo propuesto consideró una cadena de suministro definida por 113 productores, 53 posibles centros de consolidación y 27 mercados representando en total 7 473 variables de decisión en su función objetivo.

Basado en los resultados computacionales obtenidos, la solución óptima indica que se deberían utilizar cuatro centros de consolidación en el estado de Guanajuato, los cuales pueden recibir en conjunto 86 676 t, el estado de Hidalgo y Estado de México deben dar apertura a uno y dos centros de consolidación con una capacidad de recepción de 61 y 43 t respectivamente. En el estado de Puebla, San Luis Potosí y Zacatecas se deben considerar uno, seis y diez centros de consolidación para el diseño de la red de distribución con una capacidad de recepción de 45, 67 663 y 162 019 t de tuna respectivamente.

La asignación resultante de las cantidades X_{ij} que se envían desde los productores a los diferentes centros de consolidación indica que aproximadamente 50% del total de la producción obtenida en los diferentes estados ofertantes debe ser entregada a través de los centros de consolidación localizados en el estado de Zacatecas. En esta conexión confluyen 72 productores provenientes de los estados ofertantes de Hidalgo, Estado de México y San Luis Potosí.

En la Figura 2 se muestra esta red de distribución propuesta, la cual considera además que los productores ubicados en Puebla envían la cosecha obtenida; a través, de centros de consolidación localizados en Guanajuato y San Luis Potosí.

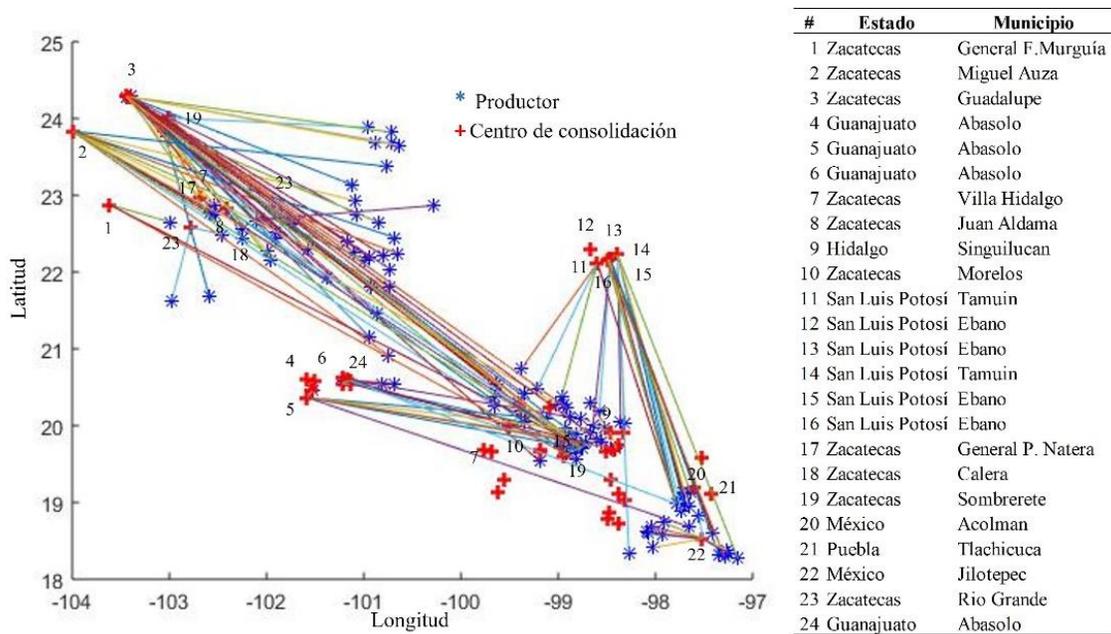


Figura 2. Red de distribución propuesta: productores-centros de consolidación.

Después de seleccionados los centros de consolidación que deben ser empleados por los productores para el envío de la cosecha con el propósito de minimizar los costos asociados con el transporte, el modelo calculó la asignación óptima hacia los diferentes mercados que maximiza la ganancia para toda la cadena de suministro. La Figura 3 muestra la red de distribución resultante para las conexiones de los centros de consolidación seleccionados y los mercados demandantes.

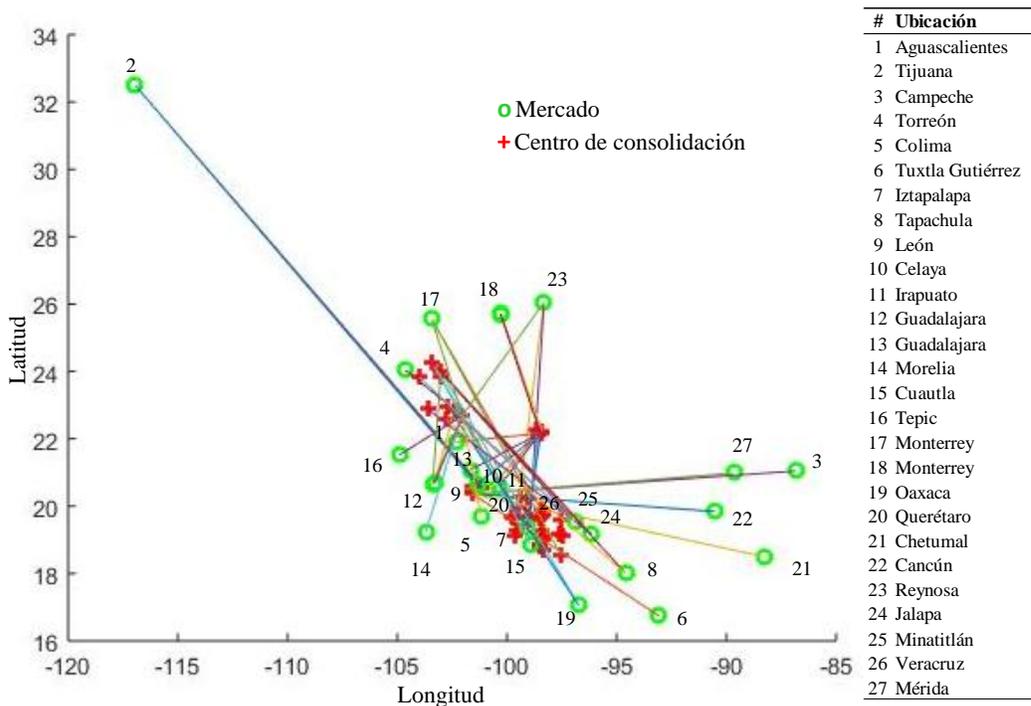


Figura 3. Red de distribución propuesta: centros de consolidación-mercados.

Los resultados en la asignación de centros de consolidación hacia mercados demandantes fueron, para las ubicaciones en el estado de Guanajuato se debe enviar aproximadamente 50 000 t en los mercados de Baja California, 19 000 t en Chiapas y la producción restante entre los demandantes ubicados en Yucatán, Campeche, Quintana Roo y Sonora.

Para los centros de consolidación ubicados en San Luis Potosí la producción recibida se debe enviar a los mercados de Aguascalientes 3 115 t, 22 596 t en los mercados de Guanajuato, para Nuevo León 19 166 t de tuna, Querétaro participa con 6 803 t y la producción restante se distribuye en mercados de la ciudad de México. En el caso de Zacatecas los centros de consolidación seleccionados envían 11 214 t a Coahuila, para los mercados de la Ciudad de México 20 475 t, en Guadalajara se entregan 17 610 t de tuna, 17 909 t que se deben enviar a Michoacán, en Tamaulipas 11 251 t, en Veracruz 21 079 t y la producción restante se envía a los mercados ubicados en Colima, Morelos, Chihuahua y Nayarit.

Los resultados indican que de los 53 posibles centros de consolidación solo es necesario utilizar 24 de estos para optimizar la red de distribución, lo que representa un ahorro en los costos operativos, se consideró también que el estado de Zacatecas es una ubicación estratégica para conectar la demanda con el suministro de tuna.

Los mercados más alejados de los lugares en donde se cosecha, representan puntos de alta demanda y por consiguiente de mayor ganancia, en el modelo propuesto estas ubicaciones son prioridad para el diseño de la red; sin embargo, debido a que los centros de consolidación seleccionados en este estudio se ubican en los estados en donde se cosecha la tuna, los costos asociados con el transporte son considerablemente mayores en aquellos mercados distantes como Baja California o Quintana Roo. Los resultados de este estudio sugieren centralizar la producción en los estados con mayor superficie disponible para la siembra, para que a través de estos sea distribuida la tuna a los diferentes mercados en el país.

Conclusiones

A través del modelo propuesto se delimitó una red de distribución que consideró los costos asociados con el transporte entre las ubicaciones de productores, centros de consolidación y mercados. Con esta propuesta, es posible identificar la asignación óptima que maximiza la ganancia para toda la cadena de suministro. Las ubicaciones ideales de acuerdo a los resultados obtenidos permiten conectar el suministro con la demanda con una estrategia de centros de consolidación.

El estado de Zacatecas representa una ubicación clave para asegurar el suministro en las regiones centro y norte del país, ya que en este punto confluyen por lo menos 50% de la cosecha obtenida de los diferentes productores seleccionados en este estudio. En la mayoría de los casos, las capacidades de los centros de consolidación en el modelo son cubiertas al 100%; sin embargo, como trabajos futuros se pueden definir restricciones en los niveles de inventario que reciben de los diferentes productores con el propósito de evaluar otras posibles ubicaciones que mejoren la solución obtenida. Con esta estrategia se podría considerar también la consolidación de otros productos agroalimentarios que se puedan distribuir a través de la red propuesta.

Se sugiere incluir dentro del modelo de optimización restricciones enfocadas en el decaimiento de la calidad, aspectos como el mantener la temperatura y la apariencia física de los productos agroalimentarios son características clave que deben ser consideradas para mejorar el modelado y diseño de la red.

Agradecimientos

Los autores expresan su reconocimiento a la Escuela Superior de Ciudad Sahagún de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, así como al PRODEP por el apoyo otorgado para la realización de este estudio.

Literatura citada

- Agustina, D.; Lee, C. K. M. and Piplani, R. 2014. Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains. *Int. J. Produc. Econ.* 152:29-41.
- ASERCA. 2017. Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. Padrón Nacional de Centros de Acopio. <http://www.aserca.gob.mx/comercializacion/acopio>.
- Ayllon, B. J.; Omaña, S. J.; Sangerman, J. D.; Garza, B. L.; Quintero, R. J. y González, R. F. 2015. Modelo de transporte en México para la minimización de costos de distribución de tuna (*Opuntia* spp.) en fresco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(7):1615-1628.
- Badole, C. M.; Jain, R.; Rathore, A. P. S. and Nepal, B. 2012. Research and opportunities in supply chain modeling. A review. *Int. J. Sup. Chain. Mgt.* 1(3):63-86.
- Barrera, J.; Aguilar, Z, A.; Ortiz, B, O. y García, L. L. 2011. Producción y comercialización de tuna en fresco bajo diferentes modalidades en Hidalgo, México. *Rev. Mex. Agron.* 15(38):605-614.
- Fahui, W. and Yanqing, X. 2011. Estimating O-D travel time matrix by Google Maps API implementation, advantages, and implications. *Ann. GIS.* 17(1):199-209.
- Ghaffari, N. N.; Ghazanfari, M. and Teimoury, E. 2015. Hub-and-spoke logistics network design for third party logistics service providers. *Inter. J. Manag. Sci. Eng. Manag.* 11(1):49-61.
- Granillo, M. R.; Olivares, B. E.; Martínez, F. J. L. y Caballero, M. S. O. 2017. Gestión de operaciones en una cadena de suministro agroalimentaria. *Ciencias Holguin.* 23(4):1-17.
- Hajghasema, M. and Abbas, A. 2016. Optimal routing in supply chain aimed at minimizing vehicle cost and supply. *Procedia Econ. Finance.* 36:353-362.
- Hamidi, M.; Gholamian, M. and Shahanaghi, K. 2014. Developing prevention reliability in hub location models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O. J. Risk Reliability.* 228(4):337-346.
- Kreng, V. and Chen, F. 2008. The benefits of a cross-docking delivery strategy: a supply chain collaboration approach. *Production Planning and Control.* 19:229-241.
- Küçükoğlu, I. y Öztürk, N. 2017. Two-stage optimisation method for material flow and allocation management in cross-docking networks. *Inter. J. Produc. Res.* 55(2):410-429.
- México Produce. 2016. México Produce. <http://www.mexicoproduce.mx/2016/10/el-nopal-y-tuna.html>.
- Moreno, Q. E. 2014. Índices de precios en el transporte por carretera. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

- Pinedo, E. J; Franco, B. A. y Hernández, F. A. 2010. Comportamiento poscosecha de cultivares de tuna por efecto del manejo del huerto y temperatura de frigo conservación. *Rev. Iberoam. Technol. Postcosecha*. 11(1):43-58.
- Ramírez, A, O.; Figueroa, H. E. y Espinosa, T. L. 2015. Análisis de rentabilidad de la tuna en los municipios de Nopaltepec y Axapusco, Estado de México. *Rev. Mex. Agron.* 19(36):1199-1210.
- Reina, U. M. y Cortés, A. F. 2015. Selección de una estructura de red logística de distribución para el programa mercados campesinos usando técnicas de toma de decisiones multicriterio. *Rev. Cienc. Estratégicas*. 23(33):89-108.
- Sanabria, A. L.; Peralta, L. A. M. y Orjuela, J. A. 2017. Modelos de localización para cadenas agroalimentarias perecederas: una revisión al estado del arte. *Ingeniería*. 22(1):23-45.
- SIAP. 2017. Servicios de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cierre de la producción agrícola, cultivo de tuna. <http://nube.siap.gob.mx/cierre-agricola/>.
- SNIIM. 2017. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Precios de mercados nacionales, frutas y hortalizas. <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>.
- Tsao, Y. C. and Lu, J. C. 2012. A supply chain network design considering transportation cost discounts. *Transportation Research Part E. Logistics and Transportation Review*. 48(2):401-414.
- Vasiljevic, D.; Stepanovic, M. and Manojlovic, O. 2013. Cross docking implementation in distribution of food products. *Econ. Agric.* 60(1):91-101.