

Caso práctico de localización óptima de centros logísticos para agro-productores

Case study of optimal location on logistics centers for agro-producers

Jennifer Arellana-Guzman¹ <https://orcid.org/0000-0003-0042-2783>,
Julián Arellana Ochoa¹ <https://orcid.org/0000-0001-7834-5541>, Víctor Cantillo Maza¹
<https://orcid.org/0000-0003-1184-2580>, Carlos Otero Palencia² <https://orcid.org/0000-0001-7517-0918>

¹Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
arellana@uninorte.edu.co, jarellana@uninorte.edu.co,
victor.cantillo@uninorte.edu.co

²University of California Davis, Davis CA, USA
cjotero@uninorte.edu.co



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2022/05/25
Aceptado: 2022/06/24
Publicado: 2022/06/30

Resumen

En América latina, gran parte de la producción agrícola está a cargo de pequeños productores con bajos nivel de tecnificación y carentes de procesos logísticos robustos, lo cual limita la posibilidad de acceder a grandes mercados con precios competitivos, afectando sus posibilidades de crecimiento económico y bienestar. Esta investigación desarrolla un modelo para la localización óptima de instalaciones (centros de acopio) para productores agrícolas, donde se logra consolidación de los productos. El propósito es reducir costos logísticos y de transporte mediante explotación conjunta de economías de escala, considerando la variabilidad de algunos de los factores del modelo y analizando escenarios. Las sinergias entre productores permitirían aumentar el acceso a grandes mercados, facilitar procesos de consolidación y agregación de valor. Se formuló un modelo de programación lineal entero mixto que consiste en una red de centros de acopio compartidos, multiproducto, multicliente, multiperíodo, con opción de viajes directos o a través de los centros consolidadores. El sistema está apoyado en una plataforma web prototipo que permitirá a los agro-productores mayor participación y poder de negociación comercial. Se realizó una aplicación del modelo a pequeños productores del departamento Atlántico, Colombia, cuyos resultados verificaron las bondades de la propuesta. Este estudio comprobó los centros de acopio generan potenciales beneficios económicos para

Sumario: Introducción, Antecedentes, Metodología, Resultados y Conclusiones.

Como citar: Arellana-Guzman, J., Arellana, J., Cantillo, V. & Carlos Otero-Palencia, C. (2022). Caso práctico de localización óptima de centros logísticos para agro-productores. *Revista Tecnológica - Espol*, 34(2), 228-246. <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/940>

el sistema. Los principales factores que influyen los resultados de la aplicación del modelo son los niveles de producción, la distancia transportada y calidad de productos.

Palabras clave: Centros de acopio, economía de escala, localización de instalaciones, transporte, sinergia.

Abstract

In Latin America, a large part of agricultural production is carried out by small producers with low levels of modernization and lacking robust logistic processes, which limits the possibility of accessing large markets with competitive prices, affecting their economic growth and welfare possibilities. This research develops a model for the optimal location of facilities (agricultural warehouses) for agricultural producers, where product consolidation is achieved. The purpose is to reduce logistics and transportation costs by jointly exploiting economies of scale, considering the variability of some factors, and analyzing scenarios. Synergies between producers would increase access to large markets, facilitate consolidation processes and add value. A mixed-integer linear programming model was formulated, consisting of a network of shared multi-product, multi-customer, multi-period collection centers, with the option of direct trips or through the consolidating centers. The system is supported by a prototype web platform that will allow farmers greater participation and commercial negotiating power. The model was applied to small producers in the department of Atlántico, Colombia, and the results verified the benefits of the proposal. This study proved that agricultural warehouses generate potential economic benefits for the system. The main factors influencing the results are production levels, distance transported, and product quality.

Keywords: Agricultural warehouses, economy of scale, location of facilities, transportation, synergy.

Introducción

El sector agropecuario es un pilar esencial para la seguridad alimentaria y representa un activo valioso para cualquier economía. Particularmente, UPRA (2017)UPRA (2017) afirma que en el departamento del Atlántico-Colombia, el sector agropecuario constituye un factor de transcendental importancia y el campesino representa un elemento de equilibrio económico, social y político en el desarrollo regional. El reporte muestra que, a pesar de que el 82% de la superficie total del territorio es utilizada para el sector rural y la actividad agropecuaria, el sector presenta problemas que les dificultan en gran medida su desarrollo y crecimiento en el mercado, destacando entre ellos el bajo acceso a los mercados grandes, altos costos de transporte, escaso nivel de uso de TICs y bajo desempeño logístico. El análisis de indicadores y tendencias del sector agropecuario en el departamento durante los últimos años muestra que la participación del sector agrícola en el PIB ha tenido una tendencia decreciente (DNA, 2021)(DNA, 2021). Los datos de Agronet (2019)Agronet (2019) indican que, en el departamento del Atlántico, el 50% de la producción agrícola de los productos priorizados en este estudio, lo aportan 3 municipios productores de los 21 que tiene esta región. Además, los agro-productores son mayormente pequeños, con bajo nivel de tecnificación (UPRA, 2017)(UPRA, 2017).

La estructura de producción a pequeña escala dificulta el acceso a los grandes mercados, particularmente por los altos costos logísticos y de transporte. Según Munar (2019),Munar (2019),Munar (2019), los factores de llenado de los camiones en estos casos suelen ser bajos. A su vez, es habitual utilizar vehículos pequeños, que llegan a tener mayores costos por tonelada kilómetro transportada.

La presente investigación propone un modelo para localización óptima de centros de acopio (CA) que facilite mejoras en la logística para movilizar los agro-productos hacia mercados más competitivos. El modelo, apoyado en TICs, define el diseño de una red logística que permite reducción de costos aprovechando economías de escala, a la vez que facilita introducir mejoras en la calidad de los productos en los procesos de selección y manipulación. El modelo se aplica al caso del departamento del Atlántico, Colombia; no obstante, la metodología planteada es suficientemente genérica de manera que pueda ser reproducida en otros contextos.

La estrategia consiste en que los productores puedan asociarse y movilizar mayores volúmenes conjuntos. La utilización de centros de acopio (CA) permite realizar envíos en camiones más grandes que poseen menores costos de transporte por unidad. Además, los CA pueden incluir procesos más rigurosos de calidad y reducir pérdidas por manipulación y almacenamiento.

El modelo de localización de los centros de acopio es un modelo lineal entero mixto que busca maximizar los beneficios de los agro-productores, cuyos ingresos son las compraventas de los productos. El caso objeto de estudio involucra los costos concernientes a la gestión de los CA y del transporte. El modelo consiste en una red que permite tanto envíos directos (sin consolidación) como envíos con paradas en los CA (con consolidación), que consideran incentivos de precios sobre los costos de transporte basados en el volumen (economía de escala). Es un modelo multiproducto, multiproductor, multicliente y multiperíodo. Por fines prácticos, se consideró realizar agregación de datos en la cantidad de agro-productores por municipios productores y en la cantidad de productos por familias de productos; además, se conformaron asociaciones entre los productores por sub-coaliciones.

A pesar de que analizar sub-coaliciones implica un mayor esfuerzo computacional, se hizo necesario para encontrar asociaciones entre los productores, donde tanto a pequeños como medianos y mayores productores se les haga atractivo colaborar y participar en la consolidación de los productos. Este estudio busca considerar condiciones racionales para que diferentes productores participen. Asimismo, a pesar de que un gran productor puede colaborar para que más de un CA alcance economía de escala, esto implicaría que aumenten sus costos individuales, con la recompensa de que será un bien para el sistema; sin embargo, puede que el productor prefiera realizar su envío individualmente y no participar. Considerando que los grandes productores son un factor clave para alcanzar economía de escala, para evitar tal riesgo, se consideró que un productor solo puede usar un CA por viaje.

Adicionalmente, en busca de tomar en cuenta la sensibilidad del modelo a las variables incluidas, se realizó un diseño experimental factorial en donde se combinan tres factores, cada uno en tres niveles. A su vez, para cada formación de sub-coalición se analizan dos escenarios en el que se comparan las ganancias al consolidar los productos, haciendo uso de los CA versus a cuando se realiza individualmente por los CA y por viajes directos al cliente.

El sistema propuesto se apoya en una plataforma web prototipo que servirá como una herramienta para realizar comercio electrónico que permitirá aumentar la participación y poder de negociación de los pequeños agro-productores. El sistema facilita la asociación, consolidando las ofertas de varios productores, utilizando para tal propósito los centros de acopio.

El modelo logístico propuesto ofrece oportunidades a pequeños productores para acceder a mercados más competitivos, mejorando el poder de negociación, agregando valor y

calidad a la oferta. En síntesis, se busca facilitar el desarrollo de formas de comercialización más competitivas, lo cual permitirá avanzar hacia una agricultura más eficiente, equitativa y sostenible, con mayores posibilidades para los pequeños agricultores de mejorar su participación en los mercados.

Antecedentes

Un impulsador que pudiera compensar en parte las dificultades que se presentan en el desarrollo económico del sector, es lograr asociaciones colaborativas, para lo cual resulta particularmente útil la aplicación de TICs. El comercio electrónico facilita la expansión hacia nuevos mercados, aumenta la competitividad y calidad de servicio, y otorga respuesta rápida a las necesidades y cadenas de entrega más cortas o inexistentes, lo que puede dar lugar a una reducción de precios finales e incremento de la producción (Murillo, 2011)(Murillo, 2011). Un ejemplo relevante del alcance del comercio electrónico es Taobao, en China, que es la tienda en línea líder para el comercio de agro alimentos con un modo de comercio Business To Consumer (Yang & Wang, 2015)(Yang & Wang, 2015). En Colombia está la plataforma Comproagro que funciona gratuitamente como una *market place*, donde los agricultores se registran, comparten la información de sus productos y se publica el clasificado, para que posteriormente el comprador y el vendedor concreten la logística (Benavides, 2019)(Benavides, 2019).

Los centros de acopio son instalaciones logísticas que facilitan la consolidación, transporte y comercialización de los productos agrícolas. Dados los recursos requeridos para su operación y mantenimiento, un problema típico es definir la localización óptima de tales facilidades. Para la construcción del modelo de localización de instalaciones, también conocido como Facility Location Problem (FLP), se tomaron como referencia artículos como el escrito por Keskin & Üster (2007)Keskin & Üster (2007), quienes proponen un modelo de localización de instalaciones minimizando costos involucrando análisis multiproducto, costos fijos en los centros de distribución, restricciones capacidad y uso de variable de decisión para definir la localización de los centros de acopio.

Autores como Tsiakis et al. (2001)Tsiakis et al. (2001) estudiaron costos por manipulación de productos y costos de transporte para distintas familias de productos. Los ahorros por economía de escala fueron estudiados por Andrade-Pineda et al. (2015),Andrade-Pineda et al. (2015), quienes modelaron los descuentos por cantidad no lineales en un problema de selección de proveedores mediante una optimización lineal entera mixta, analizan tres métodos alternativos de linealización de la función de costos de descuento de todas las unidades modificadas y abordan los problemas mediante un artilugio que permite reducir el número de variables binarias y, en consecuencia, el número de restricciones enteras, sin afectar el tamaño de la red y beneficiando eficiencia computacional. Definen un conjunto de rangos de descuentos que es aplicado sobre el flujo que se envía en cada arco de la red.

Lu et al. (2018)Lu et al. (2018) propusieron un modelo de localización de instalaciones logísticas a nivel regional en diferentes niveles de las cadenas de suministros. En una red multimodal definen las necesidades de expansión o cierre de instalaciones durante diferentes periodos de tiempo. La configuración de la red envía altos volúmenes entre parques logísticos y centros de distribución, para luego enviar volúmenes más pequeños hacia los clientes. El modelo involucra restricciones de capacidad, balance de masa y sincronización oferta-demanda.

Metodología

Este estudio propone como estrategia para aumentar la competitividad y desarrollo agro-productores un modelo de localización de instalaciones, centros de acopio, apoyado en TICs. Se usó centros de acopio compartidos ubicados estratégicamente para la consolidación de agro-productos. El modelo fue aplicado a cultivadores del departamento del Atlántico, Colombia.

Modelo de localización de centros de acopio

Inicialmente se diseñó una red logística que involucra resolver el problema de localización de instalaciones codificado en AMPL® con solver CPLEX. Es un modelo de programación lineal entero mixto donde se maximizan las ganancias del sistema. El modelo implica centros de acopios (CA) multiproducto, multiproductor, multcliente y multiperíodo. Incluye límites de capacidad en CA, economía de escala variables según los volúmenes transportados, consideraciones de calidad de los productos y asignación de la carga en viajes directos del productor al cliente o en viajes utilizando los CA bajo una demanda determinística. El modelo consideró incentivos por volumen de carga consolidada en centros de acopio, utilizando para tal fin, el factor de descuento $FD^{r_i t_i}$, los factores de descuentos utilizados como los rangos de volumen en que aplican se puede ver en la Tabla 4. La formulación matemática se presenta a continuación y las notaciones utilizadas se pueden observar en la Tabla 1.

Maximizar: (MLI)

$$\begin{aligned}
 &= \left[\sum_{o_i \in O} \sum_{c_i \in C} \sum_{p_i \in P} \sum_{t_i \in T} \alpha I^{p_i} X_{o_i c_i}^{p_i t_i} + \sum_{a_i \in A} \sum_{c_i \in C} \sum_{p_i \in P} \sum_{t_i \in T} I^{p_i} X_{a_i c_i}^{p_i t_i} \right] \\
 &- \left[\sum_{o_i \in O} \sum_{a_i \in A} \sum_{p_i \in P} \sum_{t_i \in T} X_{o_i a_i}^{p_i t_i} (CT_{o_i a_i} + CM) \right. \\
 &+ \sum_{a_i \in A} \sum_{c_i \in C} \sum_{r_i \in R} \sum_{t_i \in T} CT_{a_i c_i} X D_{a_i c_i}^{r_i t_i} \\
 &\left. + \sum_{o_i \in O} \sum_{c_i \in C} \sum_{p_i \in P} \sum_{t_i \in T} CT_{o_i c_i} X_{o_i c_i}^{p_i t_i} + \sum_{a_i \in A} CF_{a_i} Y_{a_i} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

S.A.

$$\sum_{r_i \in R} Z_{a_i c_i}^{r_i t_i} = 1 \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, t_i \in T \quad (2)$$

$$X_{a_i c_i}^{p_i t_i} = \sum_{r_i \in R} X_{a_i c_i}^{p_i r_i t_i} \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, p_i \in P, t_i \in T \quad (3)$$

$$X_{a_i c_i}^{r_i t_i} = \sum_{p_i \in P} X_{a_i c_i}^{p_i r_i t_i} \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (4)$$

$$-X_{a_i c_i}^{r_i t_i} + L^{r_i t_i} * Z_{a_i c_i}^{r_i t_i} \leq 0 \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (5)$$

$$X_{a_i c_i}^{r_i t_i} - U^{r_i t_i} * Z_{a_i c_i}^{r_i t_i} \leq 0 \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (6)$$

$$X N^{r_i t_i} * Z_{a_i c_i}^{r_i t_i} \leq X D_{a_i c_i}^{r_i t_i} \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (7)$$

$$X_{a_i c_i}^{r_i t_i} * (1 - FD^{r_i t_i}) \leq X D_{a_i c_i}^{r_i t_i} \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (8)$$

$$X_{a_i c_i}^{r_i t_i} \leq Z_{a_i c_i}^{r_i t_i} * M \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (9)$$

$$V_{o_i t_i}^{p_i} = \sum_{a_i \in A} X_{o_i a_i}^{p_i t_i} + \sum_{c_i \in C} X_{o_i c_i}^{p_i t_i} \quad \forall o_i \in O, p_i \in P, t_i \in T \quad (10)$$

$$\sum_{a_i \in A} X_{a_i c_i}^{p_i t_i} + \sum_{o_i \in O} X_{o_i c_i}^{p_i t_i} \leq D_{c_i t_i}^{p_i} \quad \forall c_i \in C, p_i \in P, t_i \in T \quad (11)$$

$$\sum_{o_i \in O} X_{o_i a_i}^{p_i t_i} = \sum_{c_i \in C} X_{a_i c_i}^{p_i t_i} \quad \forall a_i \in A, p_i \in P, t_i \in T \quad (12)$$

$$\sum_{c_i \in C} \sum_{r_i \in R} X_{a_i c_i}^{r_i t_i} \leq W * Y_{a_i} \quad \forall a_i \in A, t_i \in T \quad (13)$$

$$\sum_{o_i \in O} \sum_{p_i \in P} X_{o_i a_i}^{p_i t_i} \leq W * Y_{a_i} \quad \forall a_i \in A, t_i \in T \quad (14)$$

$$X_{o_i a_i}^{p_i t_i} \leq Y_{a_i} * M \quad \forall o_i \in O, a_i \in A, p_i \in P, t_i \in T \quad (15)$$

$$X_{a_i c_i}^{r_i t_i} \leq Y_{a_i} * M \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (16)$$

$$0 \leq X_{o_i a_i}^{p_i t_i}, X_{a_i c_i}^{p_i t_i}, X_{a_i c_i}^{r_i t_i}, X_{o_i c_i}^{p_i t_i}, X_{a_i c_i}^{r_i t_i}, XD_{a_i c_i}^{r_i t_i} \quad \forall o_i \in O, a_i \in A, c_i \in C, p_i \in P, r_i \in R, t_i \in T \quad (17)$$

$$Y_{a_i}, Z_{a_i c_i}^{r_i t_i} \in \{0,1\} \quad \forall a_i \in A, c_i \in C, r_i \in R, t_i \in T \quad (18)$$

La función objetivo (1) maximiza los beneficios de los agro-productores. Se destaca que hay dos costos para el uso de un CA, uno es un costo fijo anual que corresponde a los gastos que se incurren por solo mantener abierto el centro de acopio y otro son los costos variables de cargue y descargue; en tanto que los ingresos corresponden a la compraventa de los productos agro en las centrales de abasto, asumiendo que los productos que provienen de viajes directos ($X_{o_i c_i}^{p_i t_i}$) se le aplicará un factor igual o menor a 1 al precio de compraventa, ya que a diferencia de los productos provenientes de centrales de abasto, estos no pasan por una selección previa ni mantienen la calidad de los productos. La ecuación (2) indica que por viaje con uso de CA solo se puede aplicar un factor de descuento. La ecuación (3) define que $X_{a_i c_i}^{p_i t_i}$ es la carga por familia de producto por periodo que se transporta desde un CA hasta un cliente. La ecuación (4) determina que $X_{a_i c_i}^{r_i t_i}$ es la carga consolidada que se transporta desde un CA hasta un cliente con un descuento del rango r en un periodo de tiempo. Las restricciones (5) y (6) identifican en que rango de descuento se encuentra la carga a transportar desde cada CA hacia cada cliente. La ecuación (7) define la cantidad mínima que se puede cobrar para aprovechar el siguiente descuento en cada periodo de tiempo, aplicable en envíos desde CA hasta clientes. La ecuación (8) refleja el descuento aplicado sobre el flujo de carga transportado ($XD_{a_i c_i}^{r_i t_i}$) desde el CA hasta el cliente para cada periodo de tiempo. La ecuación (9) indica que cuando la variable binaria $Z_{a_i c_i}^{r_i t_i}$ es uno, existe un flujo de carga $X_{a_i c_i}^{r_i t_i}$ que aplica a un descuento del rango r_i ($r_i \in R$), de lo contrario, si $Z_{a_i c_i}^{r_i t_i}$ es cero, el flujo $X_{a_i c_i}^{r_i t_i}$ es cero también. La ecuación (10) garantiza que toda la oferta disponible en cada periodo de tiempo sea enviada, lo que implica que se aprovecha toda la oferta interna. La ecuación (11) permite al modelo que la oferta pueda ser menor o igual que la demanda de cada familia de producto para cada periodo de tiempo. La ecuación (12) garantiza conservación de flujos. Las ecuaciones (13) y (14) restringen al modelo para que no se exceda la capacidad de la instalación. Las restricciones (15) y (16) limita al modelo para que el flujo enviado hacia y desde un CA solo tenga un valor mayor a cero cuando se abre un CA. La ecuación (17) previene que el flujo de carga a transportar sea no negativo y (18) define variables que son binarias.

Tabla 1

Notaciones de Matemáticas Utilizadas en el Modelo de Localización de Instalaciones

Conjuntos	
O	Conjunto de Orígenes de municipios productores.
A	Conjunto de potenciales centros de Acopio.
C	Conjunto de Clientes.
P	Conjunto de Familias de Productos Agropecuarios.
R	Conjunto de rangos de descuentos para el flujo de carga transportado.
T	Conjunto de periodos de tiempo en el año.
Parámetros del modelo	
$CT_{o_i a_i}$	Costo de transporte por tonelada del nodo o_i ($o_i \in O$) al nodo a_i ($a_i \in A$).
$CT_{a_i c_i}$	Costo de transporte por tonelada del nodo a_i ($a_i \in A$) al nodo c_i ($c_i \in C$).
$CT_{o_i c_i}$	Costo de transporte por tonelada del nodo o_i ($o_i \in O$) al nodo c_i ($c_i \in C$).
CF_{a_i}	Costos fijos de apertura y administración del centro de acopio ubicado en a_i ($a_i \in A$).
CM	Costos de manipulación por tonelada en los CA a_i ($a_i \in A$).
W	Capacidad límite de las bodegas de los CA a_i ($a_i \in A$).
M	Es un número muy grande.
$D_{c_i t_i}^{p_i}$	Demanda del cliente c_i ($c_i \in C$) de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) para cada periodo t_i ($t_i \in T$).
$V_{o_i t_i}^{p_i}$	Oferta del origen o_i ($o_i \in O$) de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) para cada periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$L^{r_i t_i}$	Límite inferior del flujo de carga con descuento del rango r_i ($r_i \in R$) para un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$U^{r_i t_i}$	Límite superior del flujo de carga con descuento del rango r_i ($r_i \in R$) para un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$FD^{r_i t_i}$	Factor de descuento del rango r_i ($r_i \in R$) para un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$XN^{r_i t_i}$	Cantidad mínima negociada de la carga a transportar para aprovechar un descuento del rango r_i ($r_i \in R$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
IP_i	Importe o precio de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) en el mercado.
α	Factor de calidad aplicados sobre los precios de las familias de producto p_i ($p_i \in P$) en viajes directos del nodo o_i ($o_i \in O$) al nodo c_i ($c_i \in C$).
Variables de decisión	
Y_{a_i}	1, si el centro de acopio es abierto en a_i ($a_i \in A$); 0 sí no.
$Z_{a_i c_i}^{r_i t_i}$	1, si el flujo de carga transportado desde el centro de acopio a_i ($a_i \in A$) hasta el cliente c_i ($c_i \in C$) tiene el descuento del rango r_i ($r_i \in R$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$); 0 sí no.
$X_{o_i a_i}^{p_i t_i}$	Flujo de carga de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) en toneladas que se transporta desde el origen o_i ($o_i \in O$) al nodo a_i ($a_i \in A$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$X_{a_i c_i}^{p_i t_i}$	Flujo de carga de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) en toneladas que se transporta desde el centro de acopio a_i ($a_i \in A$) hasta el cliente c_i ($c_i \in C$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$X_{a_i c_i}^{p_i r_i t_i}$	Flujo de carga de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) en toneladas que se transporta desde el centro de acopio a_i ($a_i \in A$) hasta el cliente c_i ($c_i \in C$) con rango de descuento r_i ($r_i \in R$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$X_{a_i c_i}^{r_i t_i}$	Flujo de carga total cuando se consolidan varias familias de productos que se transporta desde el centro de acopio a_i ($a_i \in A$) hasta el cliente c_i ($c_i \in C$) con rango de descuento r_i ($r_i \in R$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$X_{o_i c_i}^{p_i t_i}$	Flujo de carga de la familia de producto p_i ($p_i \in P$) en toneladas que se transporta desde el origen o_i ($o_i \in O$) hasta el cliente c_i ($c_i \in C$) en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).
$XD_{a_i c_i}^{r_i t_i}$	Cantidad de flujo de carga transportada desde el centro de acopio a_i ($a_i \in A$) hasta un cliente c_i ($c_i \in C$) con descuento del rango r_i ($r_i \in R$) y en un periodo de tiempo t_i ($t_i \in T$).

Nota. Elaboración propia

Comercio electrónico en plataforma web

Considerando que los pequeños agricultores conforman un sector con bajo nivel de uso de tecnologías TIC para los procesos de comercialización (Montiel Paternina, 2013; SPDA, 2016), se propuso complementar el modelo de gestión logística con una plataforma web prototipo de apoyo para realizar comercio electrónico, amigable y flexible. La plataforma facilitará gestionar procesos de comercialización directa entre productores y compradores, eliminar intermediarios y brindar la información necesaria para tal fin. Así también, posibilitará

aplicar estrategias colaborativas por medio de una modalidad que funciona como ventas de tipo subasta al por mayor para el aprovechamiento de economía de escala, pero con la particularidad de que los productores aquí podrán consolidar sus productos para atender demandas que superen sus capacidades. Es una herramienta de apoyo a agro-productores que tienen bajos niveles de producción, que no pueden satisfacer independientemente una demanda y/o no se les hace rentable transportar sus productos. Al mismo tiempo, disminuye la desconfianza, que es uno de los principales problemas que se presentan en las estrategias colaborativas (Hartman & Dror, 2003; Nagarajan & Sošić, 2008).

La aplicación del comercio electrónico brinda importantes oportunidades para el sector agropecuario, las empresas lo usan como medio de comercialización, generando ventajas como incremento de la producción, creación de oportunidades de negocio y nuevas formas de distribución de sus productos y servicios. Desde los inicios del comercio electrónico, su aplicación ha impactado positivamente en el mercado, favoreciendo altos crecimientos. Un ejemplo claro en Colombia fueron las ventas minoristas por canales electrónicos, ya que han venido incrementándose a una tasa interanual cercana a 50% desde 2013, superando los 5.000 millones de dólares en el 2017 (Medina, 2018). La pandemia COVID-19 demostró claramente las bondades del comercio electrónico (Guthrie et al., 2021).

La iniciativa propuesta busca conectar a los agro-productores con mercados competitivos, mejorando los beneficios tanto para productores como para consumidores, dignificando la vida de los agro-productores. La nueva modalidad que se sugiere para la plataforma web prototipo consiste en un espacio donde se podrán realizar publicaciones de compraventa tipo subasta con modalidad colaborativa. La dinámica consiste en que el cliente (comprador) podrá demandar la cantidad y proponer un precio y los vendedores podrán aceptar, rechazar o contraofertar, ya sea variando la cantidad o el precio. La dinámica de oferta y contraoferta se repite hasta lograr un acuerdo entre ambas partes. Cabe destacar que, si un productor(vendedor) no tiene la oferta suficiente para satisfacer la demanda del comprador, podrá ofertar su inventario disponible. Esto es posible ya que existe la posibilidad de consolidar los productos entre varios agro-productores en un CA. Esta dinámica favorece relaciones más equitativas entre los productores agropecuarios por medio de una dinámica de negociación activa con modalidad colaborativa. El diagrama de flujos del aplicativo se encuentra en el Anexo 1.

Método de solución

Inicialmente, antes de resolver el modelo de localización de instalaciones (MLI), se propone la formación de sub-coaliciones (SB). Para ello, se estima el modelo MLI en la instancia donde están todos los municipios productores del Atlántico. Seguidamente se realiza un filtro escogiendo como productores interesados en consolidar sus productos, aquellos a quienes les conviene usar los CA para lograr beneficios adicionales respecto al envío directo. La distribución de productores por sub-coalición (SB) será la misma que la de los productores que hay en cada CA en la instancia donde están todos los municipios productores; es decir, la cantidad de sub-coaliciones, sería la misma cantidad de CA abiertos. Cabe destacar que un productor no puede estar en más de una sub-coalición y, por lo tanto, aquellos productores que realizan envíos a más de un CA serán asignados a la sub-coalición que hace referencia al CA donde más envían carga.

Posteriormente, se calcula, para cada una de las sub-coaliciones (SB), su valor resultante $V(SB)$, el cual representa las ganancias alcanzadas, obtenidas de correr el MLI con parámetros $CT_{O_i a_i}$, $CT_{a_i c_i}$, $CT_{O_i c_i}$, $X_{O_i a_i}^{p_i t_i}$, $X_{a_i c_i}^{p_i r_i t_i}$, $X_{a_i c_i}^{p_i t_i}$, $X_{a_i c_i}^{r_i t_i}$, $X_{O_i c_i}^{p_i t_i}$, $XD_{a_i c_i}^{r_i t_i}$, CF_{a_i} , CM , W , M , $D_{c_i t_i}^{p_i}$,

$V_{o_i t_i}^{p_i}$, $L^{r_i t_i}$, $U^{r_i t_i}$, $FD^{r_i t_i}$, $XN^{r_i t_i}$, I^{p_i} y α . El algoritmo general del MLI resuelve problema MLI para cada subcoalicción SB_j y se calcula la ganancia $V(SB_j)$, cómo se presenta a continuación:

Algoritmo MLI

For $j=1: N_{SB}$. Calcular $V(SB_j)$ resolviendo el problema MLI_i

donde $i = 1, 2, \dots, |SB_j|$.

N_{SB} : Cantidad de sub-coaliciones.

En este estudio se analizaron dos escenarios (E1 y E2), donde se compararon las ganancias de transportar consolidando con otros productores por centros de acopio versus cuando se envía individualmente ya sea por CA o por viaje directo. En el escenario E1 (D1vsD2) se comparó cuando se consolida entre varios productores versus a cuando se transporta individualmente, haciendo uso de centros de acopio, en tanto que, el escenario E2 (D1vsD3) se comparó cuando se consolida entre varios productores versus cuando se realiza envíos directos individualmente, sin usar los CA. A continuación, se define cada alternativa para transportar los productos a las centrales de abastos:

Alternativa D1, transportar consolidando con otros productores haciendo uso de CA.

Alternativa D2, transportar individualmente haciendo uso de CA.

Alternativa D3, transportar individualmente, en viajes directos entre origen y destino, sin usar CA.

Para determinar las ganancias alcanzadas individualmente cuando se transporta por las alternativas D2 y D3, se debe resolver los subproblemas MLI_D2 que es MLI cuando se corre el modelo con solo un productor o_i ($o_i \in O$) y el subproblema MLI_D3 que es MLI con la modificación de que solo existe la alternativa de transporte a través de viajes directos por productor o_i ($o_i \in O$). Los algoritmos para determinar las ganancias cuando se transporta por las alternativas D2 y D3 se resuelve para cada productor, se calcula las ganancias por productor $V(o_i)$ y se suman las ganancias de los productores por subcoalicción ($V_D2(SB_j)$ y $V_D3(SB_j)$), como se puede ver continuación:

Algoritmo para D2

For $k=1:N$. Calcular $V(o_i)$ resolviendo el subproblema $MLI_D2_{o_i}$,

(Ganancias D2 por productor)

For $j=1: N_{SB}$

$V_D2(SB_j) = \sum_{o_i \in O_{SB_j}} V(o_i)$, (Ganancias D2 por subcoalicción)

donde $o_i = 01, 02, \dots, 021$ y $N = 21$, (Todos los municipios productores)

o_j = último productor considerado en SB_j .

O_{SB_j} = es el conjunto de productores que conforman la subcoalicción SB_j .

Algoritmo para D3

For $k=1:N$. Calcular $V(o_i)$ resolviendo el subproblema $MLI_D3_{o_i}$,

(Ganancias D3 por productor)

For $j=1: N_{SB}$

$V_D3(SB_j) = \sum_{o_i \in O_{SB_j}} V(o_i)$, (Ganancias D3 por subcoalicción)

donde $o_i = 01, 02, \dots, 021$ y $N = 21$, (Todos los municipios productores)

o_j = último productor considerado en SB_j .

O_{SB_j} = es el conjunto de productores que conforman la subcoalicción SB_j .

El análisis consideró la variabilidad que existe en algunos de los parámetros y variables del modelo y la sensibilidad de la respuesta frente a cambios en ellas. Para tal propósito, se realizó un diseño factorial fraccional en donde se combinan 3 factores o atributos, representado por las letras A, B y C, con 3 niveles representado por los números 1, 2 y 3 (ver Tabla 2), donde el nivel 1 es el que representa las peores condiciones y 3 las mejores condiciones para realizar consolidación. Los signos + o - de los factores A y C indican qué incrementos o disminuciones respecto de los valores de referencia, mientras que el factor B, los datos señalan directamente el valor que tendrá dicho factor. Aunque el diseño factorial completo fue $3^3=27$, se decidió un diseño factorial fraccional, considerando 9 situaciones (S) en total (ver Tabla 3). Este estudio resolvió el MLI, MLI_D2 y el MLI_D3 para cada formación de sub-coaliciones (SB) de cada situación del diseño factorial fraccional (S). Seguidamente se presenta el algoritmo general:

Algoritmo general

For S=1:9.

Algoritmo MLI

Algoritmo para D2 y para D3

For j=1: N_{SB}

$$\%Gananancias E1 = \frac{(V(SB_j) - V_{D2}(SB_j))}{V_{D2}(SB_j)}$$

$$\%Gananancias E2 = \frac{(V(SB_j) - V_{D3}(SB_j))}{V_{D3}(SB_j)}$$

Fin

Fin

Tabla 2

Factores y Niveles del Diseño Experimental

FACTORES		NIVELES		
		1	2	3
A	%Factor de descuento	-10%	0%	+10%
B	%Factor de calidad	0%	-20%	-40%
C	Oferta	-30%	0%	+30%

Nota. Elaboración propia

Tabla 3

Situaciones del Diseño Experimental

SITUACIONES	COMBINACIONES		
	A	B	C
S1	3	3	3
S2	1	3	2
S3	1	1	1
S4	2	2	2
S5	2	1	3
S6	2	3	1
S7	3	1	2
S8	1	2	3
S9	3	2	1

Nota. Elaboración propia

Datos

El caso de estudio consideró como nodos oferta a 21 de los 23 municipios que conforman el departamento del Atlántico, Colombia. La capital, Barranquilla y Puerto Colombia no registran producción en los productos priorizados en este estudio. Los nodos de demanda fueron los 4 clientes seleccionados: Central de abasto Gran Abasto-Soledad, Barranquillita-Barranquilla, Cedi Grupo Éxito-Malambo y Mercado Bazurto-Cartagena.

Cada familia de productos agrupa elementos de similares características, clasificados según grupo de cultivos de Agronet (2019). Se consideraron productos priorizados por la Gobernación del Atlántico & UPRA (2018) y se realizaron diagramas de Pareto con datos recopilados de Agronet (2019). Con respecto a la demanda utilizada se tomó como base el consumo promedio per cápita en toneladas semestral para las familias de productos frutales, tubérculos y plátanos recopilado en Cruz Thiriart et al. (2005) y para las hortalizas y leguminosas se utilizó el modelo de consumo propuesto por Cantillo & López (2008). Cabe destacar que, debido a que este estudio buscó que la demanda sea satisfecha con la oferta interna del departamento, con posibilidades de abarcar demandas en otros departamentos, se estimaron los consumos considerando la base poblacional de los municipios según el DANE (2005).

Con respecto a los costos de transporte utilizados, se tomó como referencia los fletes suministrados por Gran Abastos (2021) y las referencias del Sice TAC (Ministerio de transporte, 2019), resultando en un valor de referencia de \$1062/ton-km. Se tomó una distancia promedio al interior de cada municipio de 5 km, representando el acceso desde las zonas productoras hasta las cabeceras municipales.

El análisis consideró incentivos de precios sobre los costos de transporte según el volumen; es decir, economía de escala. Esto se aplicó en los tramos entre los CA hasta los puntos de demanda. En los CA se puede consolidar carga, utilizar vehículos con mayor capacidad y aprovechar más eficientemente la capacidad de los vehículos. Generalmente en los vehículos de carga, cuando no se realiza una pre-consolidación, la tasa de ocupación en términos del volumen es de aproximadamente de 60%- 70% (Rincón Munar, 2019). Para establecer los límites de los rangos de flujo transportado y los factores de descuento correspondientes, se tomaron en cuenta los costos de diferentes configuraciones de vehículos obtenido de SiceTAC (Ministerio de transporte, 2019). Se definieron cuatro rangos de volumen de carga para aplicar descuentos. Además, se estableció que en cada rango de descuentos existe una cantidad negociada (XN^{rt_i}), que es un valor fijo que se utiliza cuando es más económico declarar un exceso en la cantidad a transportar para aplicar al siguiente descuento del rango r . Para determinar estos valores se utilizó la Ecuación (19), propuesta por Andrade-Pineda et al. (2015). Los rangos, descuentos y cantidad negociada por rango se detallan en la Tabla 4.

$$XN^{rt} = L^{rt} * (1 - FD^{rt}) \quad (19)$$

Tabla 4

Rangos de Descuentos, Límites y Cantidad Negociada para los Periodos del Año en la Condición Base

Set R	Set T	L^{rt_i}	U^{rt_i}	FD^{rt_i}	XN^{rt_i}
R1	T1	0	999	0	0
R2	T1	1000	1999	0.2	800
R3	T1	2000	2999	0.3	1400

Set R	Set T	$L^{r_i t_i}$	$U^{r_i t_i}$	$FD^{r_i t_i}$	$XN^{r_i t_i}$
R4	T1	3000	267832	0.4	1800
R1	T2	0	999	0	0
R2	T2	1000	1999	0.2	800
R3	T2	2000	2999	0.3	1400
R4	T2	3000	267832	0.4	1800

Nota. Elaboración propia

Los costos fijos en los CA corresponden a los gastos que se incurren por mantener abierto un CA. Para tal propósito, se consideraron gastos por alquiler de bodega con un promedio \$11400/m²-mes. Además, se incluyeron costos de vigilancia de \$1'500.000/mes (Tu salario.org, 2021) y de administración por \$2'000.000/mes (Mosahab et al., 2011). Los costos por manipulación de productos en CA fueron estimados según el estudio de Mosahab et al. (2011), resultando \$2490/ton para cada operación de carga o descarga.

Por último, para el importe de los productos se tomó como referencia los precios pagados por las centrales de abasto, complementado con encuestas a líderes de grupos del sector agropecuario. Los precios utilizados para cada familia de productos se pueden ver en la Tabla 5.

Tabla 5

Promedio de los Importes de los Productos Priorizados en Cada Familia de Productos

FAMILIAS DE PRODUCTOS	IMPORTE [\$/ton]
Cereales	\$1,331,268.42
Frutales	\$1,537,274.39
Hortalizas	\$2,025,851.75
Leguminosas	\$2,663,829.99
Tubérculos y plátanos	\$1,221,120.31

Nota. Elaborado con los datos recopilados de las centrales de abasto Gran Abasto, Bazaruto y Grupo cedi éxito

Resultados

El MLI se evaluó en diferentes condiciones para considerar la variabilidad que existe en algunos de los parámetros y variables para el caso de aplicación. El modelo definió la localización de los CA maximizando los beneficios del sistema, considerando diferentes alternativas para transportar los productos y corridas exclusivas del modelo para cada propuesta de sub-coaliciones.

Los productores fueron agrupados por sub-coalición con el fin de hacer atractiva la colaboración y consolidación de carga para pequeños y grandes productores. Esto se logra si hay beneficios netos positivos resultantes de utilizar los CA respecto de comercializar en forma independiente. Con tal fin, el algoritmo buscó que en los CA se puedan alcanzar las cantidades necesarias de consolidación de productos para obtener los incentivos económicos por volumen. Se consideró que un productor solo pueda usar un CA por viaje para evitar que el algoritmo, al maximizar los beneficios en el sistema, asigne a los grandes productores a más de un CA y así alcanzar economía de escala en varios sitios. Sin embargo, esto puede ser conveniente para el sistema, pero no para el individuo, lo que puede ocasionar de que los grandes productores prefieran realizar sus envíos individualmente. Teniendo en cuenta que los grandes productores son un factor clave para lograr economías de escala, se reconoció el valor de realizar una adecuada formación de las sub-coaliciones.

Al evaluar el modelo MLI para cada sub-coalición SB en cada situación S, se identificó que entre los factores considerados en el diseño factorial, el que más influyó en los beneficios de usar los CA es el factor de calidad (Factor B). El factor de calidad afectó directamente al precio del producto y, a su vez, los beneficios del productor; además, evitó tener sobrecostos por devolución de productos en mal estado. Los beneficios derivados de garantizar alta calidad de los productos en los CA y disminuir las pérdidas por manipulación son determinantes en el éxito de la estrategia logística propuesta. Es menester precisar que se realizó agregación de productores por municipio. Ello supone una consolidación previa no formal de la oferta de los agro-productores por municipio.

En este estudio se consideró que el productor puede decidir entre las tres alternativas para transportar sus productos (D1, D2 y D3). Para identificar qué tan conveniente es consolidar con otros productores (D1), se realizó dos comparaciones. En un escenario E1, se comparó D1 versus D2 y en el escenario E2, se contrastó D1 versus D3. Se estimó la diferencia que existe entre alternativas y el porcentaje de ganancia que se alcanza al elegir la alternativa D1 para cada una de las situaciones del diseño factorial (S).

En general, existen altos beneficios derivados del uso de los CA. La única excepción fue en la situación con peores condiciones (S3), para la SB 2, donde resultó más conveniente la alternativa D3 (envío directo); sin embargo, la diferencia entre ambas alternativas (D1 y D3) fue solo de 0.06% (ver

Anexo 2). No obstante, existen otros beneficios derivados de la colaboración que no se reflejan directamente en el modelo. Entre estos se destacan los siguientes:

- Mayores posibilidades de acceder a grandes mercados, con posiciones más sólidas de negociación. Además, acceso a mejores condiciones de financiación.
- Mayor equidad para los pequeños productores, ya que al consolidar con otros productores pueden alcanzar los mismos beneficios que poseen productores con altos niveles de producción.
- El modelo colaborativo permite compartir riesgos, particularmente en periodos con bajos niveles de producción o ante eventos como plagas o baja de precios, como también pérdidas de clientes.

Por otra parte, los resultados evidenciaron que los productores que persistieron consolidando con otros productores en todas las situaciones (S) y en todas las sub-coaliciones (SB), fueron aquellos que se encuentran más alejados de los clientes. Por lo tanto, cuando se trata de contextos geográficos más grandes, donde se tiene que recorrer distancias más largas, se vuelve más atractivo elegir actuar de forma colaborativa (D1).

En torno a la apertura de los centros de acopios (CA), la cantidad y ubicación necesarios en cada situación (S) son presentados en la Figura 1. La tabla muestra, en forma ordenada, las situaciones con peores condiciones (color rojo) hasta las mejores condiciones (color verde) para consolidar productos. En cuanto a los municipios, con color rojo se señalan los municipios con menor frecuencia de coincidencia en la apertura de CA en todas las situaciones (S), en tanto que el color verde indica mayor frecuencia. Este análisis permitió identificar los CA más atractivos pese a la variabilidad que existe en algunos de los parámetros del modelo, considerando así la incertidumbre asociada. En general, se evidenció que a medida que en el sistema mejoran las condiciones para consolidar productos, aumenta la cantidad de CA a abrir. Las decisiones de apertura de CA deben tomar en cuenta la proximidad geográfica de algunos municipios. Se sugiere desarrollar un plan secuencial para la apertura de los CA. Los resultados sugieren apertura de CA en los municipios Repelón (o Luruaco), Candelaria (o Campo de la

Cruz), Palmar de Varela (o Santo Tomás) y Baranoa, en ese orden de prioridad. Notar que, por proximidad geográfica, se muestra una localización alternativa entre paréntesis.

Figura 1

Centros de Acopio Abiertos por Situación del Diseño Experimental Relacionado con la Frecuencia y Cantidad de Centros de Acopio

Situación	Centros de acopio abiertos											Centros de acopio abiertos por situación
	Baranoa	Ponedera	Campo de la Cruz	Barranquilla	Manatí	Santo Tomás	Palmar de Varela	Malambo	Candelaria	Luruaco	Repelón	
S3									X		X	2
S7					X				X	X	X	4
S5					X				X	X	X	4
S6							X	X	X	X	X	5
S9							X	X	X	X	X	5
S2				X		X	X	X	X	X	X	7
S4						X	X	X	X	X	X	6
S8				X		X	X	X	X	X	X	7
S1	X	X	X		X	X		X		X	X	8
Frecuencia	1	1	1	2	3	4	5	6	8	8	9	

Con todos los jugadores

Nota. Elaboración propia

Conclusiones

El modelo logístico propuesto tiene un gran potencial para aumentar la competitividad de los productores agropecuario, tal como se mostró en su aplicación al caso del departamento del Atlántico. Los resultados muestran que existen muy buenos incentivos para consolidar con otros productores usando CA. En el escenario más desfavorable, a pesar de que para algunos productores no hay ahorros por consolidar con otros productores, los resultados indican que las diferencias de las ganancias no son lo suficientemente relevantes como para renunciar a los demás beneficios que se obtienen al consolidar los productos en CA. La estrategia colaborativa permite compartir riesgos en periodos con bajos niveles de producción y otras contingencias, también, disminuye las pérdidas por daños y condiciones de almacenamiento.

La variable más relevante en el beneficio percibido por los productores fue la calidad de los productos (Factor B), por su impacto en el precio de venta. Otras variables relevantes que influyen en las ganancias percibidas por productor o_i ($o_i \in O$) y en la decisión de colaborar fueron el nivel de producción (oferta) y la distancia transportada.

Por otra parte, el uso complementario de la plataforma web prototipo para realizar comercio electrónico permitió que la estrategia colaborativa sea más eficiente, a la vez que favorece el acceso a mercados al facilitar la interacción con los clientes.

En futuras investigaciones se puede expandir el tamaño del modelo, escalándolo a otros contextos geográficos. También, analizar instancias más grandes aumentando la cantidad de clientes y agro-productores. Así mismo, es posible lograr mayores niveles de desagregación en los nodos de producción, las familias de producto y los periodos. Por su parte, las extensiones del modelo pueden involucrar la naturaleza estocástica de la demanda, la posible existencia de productos defectuosos y/o pérdidas en los envíos. Finalmente, resulta de interés realizar un análisis multimodal y la consideración de compatibilidades en las consolidaciones de diferentes tipos de carga, ya que dos productos agropecuarios podrían tener restricciones para ser enviados en el mismo vehículo.

Referencias

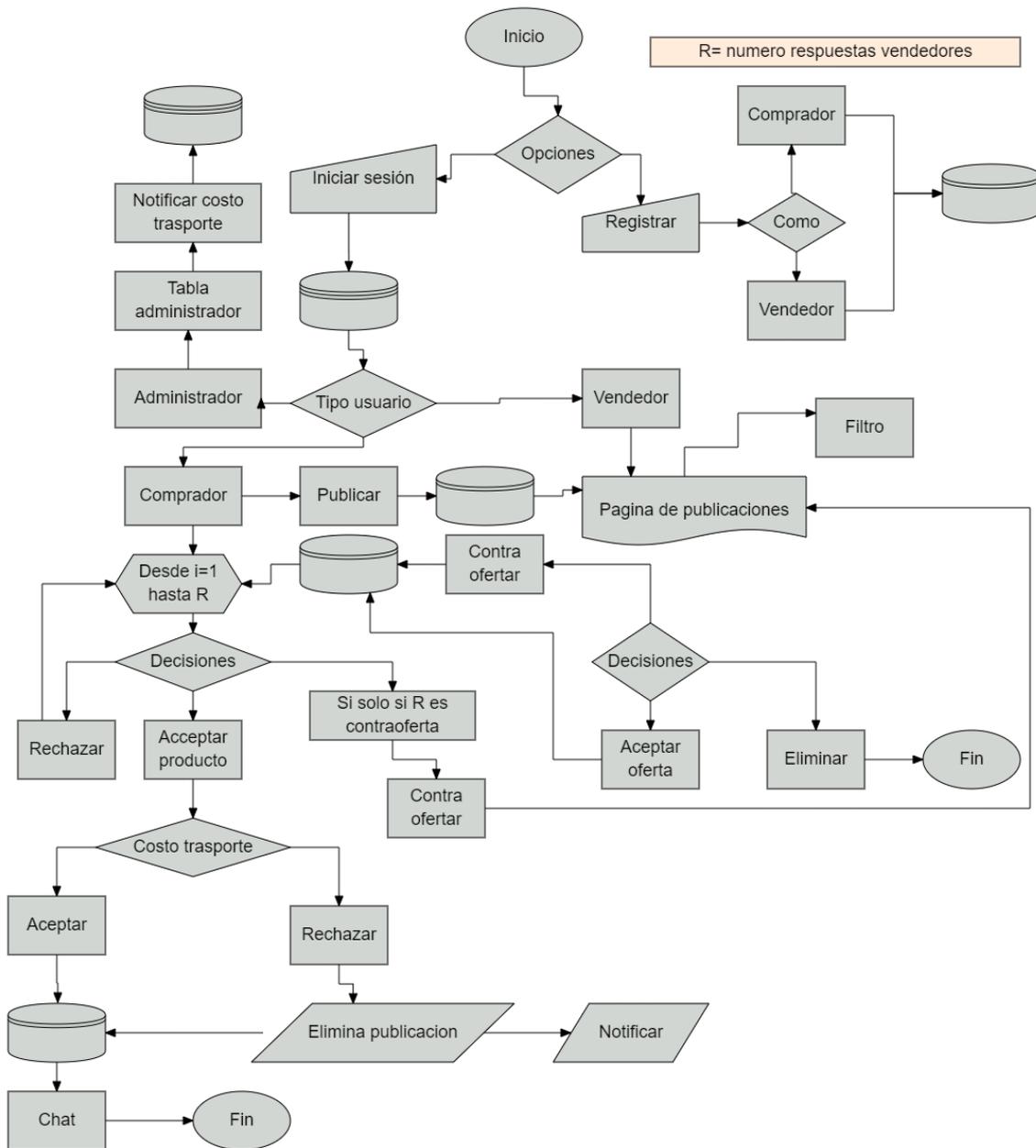
- Abaunza O., A., & León G., A. (2011). Diseño de la operatividad del centro de distribución de Colfrigos S.A. haciendo uso de un WMS – regional Bogotá. *Universidad Libre*, 4(3), 410–419.
- Agronet. (2019). *Evaluaciones Agropecuarias (EVA)*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>
- Andrade-Pineda, J. L., Canca, D., & Gonzalez-R, P. L. (2015). On modelling non-linear quantity discounts in a supplier selection problem by mixed linear integer optimization. *Annals of Operations Research*, 258(2), 301–346. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1941-2>
- Benavides, L. G. (2019). La tienda virtual Comproagro llegó a 26.000 usuarios y lanzará su propia app. *AGRONEGOCIOS, Agro*. <https://www.agronegocios.co/agricultura/la-tienda-virtual-comproagro-llego-a-26000-usuarios-y-lanzara-su-propia-app-2838760>
- Cantillo, V., & López, M. F. (2008). *Monografía de productos G21: Legumbres y Horatizas*.
- Cruz Thiriart, R., Ramírez-Vélez, R., Martínez-Torres, J., & Correa-Bautista, J. E. (2005). Encuesta nacional de la situación nutricional en Colombia. In *Revista Chilena de Nutricion* (Vol. 44, Issue 4). <https://doi.org/10.4067/s0717-75182017000400307>
- DANE. (2005). *Proyecciones de población municipal del 2019 en base a la del 2005*.
- DNA. (2021). *Cuentas nacionales anuales*. <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-anuales>.
- Gobernación del Atlántico, & UPRA. (2018). *Priorización de alternativas productivas y diagnóstico del mercado de productos agropecuarios del departamento del atlántico. Iii*, 1–78.
- Gran Abastos. (2021). *Mercadeo*. <https://www.granabastos.com.co/servicios/>
- Guthrie, C., Fosso-Wamba, S., & Arnaud, J. B. (2021). Online consumer resilience during a pandemic: An exploratory study of e-commerce behavior before, during and after a COVID-19 lockdown. *Journal of Retailing and Consumer Services*. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102570>
- Hartman, B. C., & Dror, M. (2003). Optimizing centralized inventory operations in a cooperative game theory setting. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 35(3), 243–257. <https://doi.org/10.1080/07408170304363>
- Keskin, B. B., & Üster, H. (2007). Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 5. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.034>
- Lu, H., Li, L., Zhao, X., & Cook, D. (2018). A model of integrated regional logistics hub in supply chain. *Enterprise Information Systems*, 12(10), 1308–1335. <https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1533588>
- Ministerio de transporte. (2019). *SICETAC*. <https://plc.mintransporte.gov.co/Runtime/empresa/ctl/SiceTAC/mid/417>
- Montiel Paternina, S. (2013). Impacto del tlc con estados unidos sobre los sectores económicos colombianos. *Saber, Ciencia y Libertad*, 8(1), 125–130. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2013v8n1.1885>
- Murillo, S. (2011). *Beneficios del comercio electrónico*.
- Nagarajan, M., & Sošić, G. (2008). Game-theoretic analysis of cooperation among supply chain agents: Review and extensions. *European Journal of Operational Research*, 187(3), 719–745. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.05.045>
- Rincón Munar, J. N. (2019). *Productividad en el transporte de carga por carretera en Colombia*.

- Sebastián Medina Cadena. (2018). *La Influencia Del E-Commerce En La Dinamización De Los Negocios Internacionales Entre El 2008 Y El 2018: Un Análisis Comparativo Entre Colombia Y México*. 83. <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6936/1/5122427-2018-II-NIIE.pdf>
- SPDA. (2016). *Plan de Desarrollo “Atlántico Líder.”*
- Tsiakis, P., Shah, N., & Pantelides, C. C. (2001). Design of multi-echelon supply chain networks under demand uncertainty. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(16), 3585–3604. <https://doi.org/10.1021/ie0100030>
- Tu salario.org. (2021). *Guardias de protección*. <https://tusalario.org/colombia/carrera/funcion-y-salario/guardias-de-seguridad>
- UPRA. (2017). Plan de desarrollo: Atlántico líder. *Ministerio de Agricultura*, 54.
- Yang, J., & Wang, Z. (2015). Research on the application of e-commercial modes for agro-food in mainland China: O2O and B2C. *2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Science, LISS 2015*. <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369645>

Anexos

Anexo 1

Arquitectura de la Plataforma Agrounidos.Online



Nota. Elaboración propia utilizando GoConqr (2021)

Anexo 2

Resultados del Modelo Logístico Colaborativo

S	SB	Productores	Ganancias [millones de pesos COP]			Dif. en ganancias [millones de pesos COP]		%Ganancias	
			D1	D2	D3	Dif Gan E1: D1vsD2	Dif Gan E2: D1vsD3	%Gan E1: D1vsD2	%Gan E2: D1vsD3
1	1	O1,O4,O5,O20,O21	\$23,179.12	\$22,832.78	\$13,837.49	\$346.35	\$9,341.64	1.52%	67.51%
	2	O2,O16,O19	\$23,826.65	\$23,645.16	\$13,774.00	\$181.49	\$10,052.65	0.77%	72.98%

S	SB	Productores	Ganancias [millones de pesos COP]			Dif. en ganancias [millones de pesos COP]		%Ganancias	
			D1	D2	D3	Dif Gan E1: D1vsD2	Dif Gan E2: D1vsD3	%Gan E1: D1vsD2	%Gan E2: D1vsD3
	3	O3,O12	\$39,101.35	\$39,070.19	\$23,023.31	\$31.15	\$16,078.03	0.08%	69.83%
	4	O6,O10	\$36,167.68	\$36,062.85	\$20,869.63	\$104.82	\$15,298.05	0.29%	73.30%
	5	O7,O11,O14,O18	\$56,017.88	\$55,858.11	\$33,763.26	\$159.77	\$22,254.62	0.29%	65.91%
	6	O9,O15,O17	\$52,935.07	\$52,835.65	\$31,652.70	\$99.42	\$21,282.37	0.19%	67.24%
	7	O8	\$22,627.43	\$22,627.43	\$12,953.25	\$-	\$9,674.18	0.00%	74.69%
	8	O13	\$44,538.99	\$44,538.99	\$25,444.63	\$-	\$19,094.37	0.00%	75.04%
2	1	O13	\$33,896.30	\$33,896.30	\$19,573.47	\$-	\$14,322.83	0.00%	73.17%
	2	O6,O10	\$27,559.51	\$27,470.61	\$16,054.26	\$88.90	\$11,505.25	0.32%	71.66%
	3	O4,O20,O5,O18	\$12,140.56	\$11,884.36	\$7,300.83	\$256.20	\$4,839.73	2.16%	66.29%
	4	O12,O9	\$36,206.74	\$36,156.76	\$21,581.21	\$49.98	\$14,625.53	0.14%	67.77%
	5	O8,O2,O3,O19,O16	\$43,793.77	\$43,496.24	\$25,508.71	\$297.53	\$18,285.05	0.68%	71.68%
	6	O7,O17,O11,O14,O21,O15,O1	\$74,636.07	\$74,301.85	\$44,905.62	\$334.22	\$29,730.45	0.45%	66.21%
3	1	O13	\$23,696.64	\$23,696.64	\$23,631.90	\$-	\$64.74	0.00%	0.27%
	2	O8,O2,O3,O16,O19	\$30,647.33	\$30,287.12	\$30,665.42	\$360.20	-\$18.10	1.19%	-0.06%
4	1	O1,O4,O5,O7,O11,O14,O15,O18,O20,O21	\$64,985.26	\$64,335.38	\$52,302.80	\$649.88	\$12,682.46	1.01%	24.25%
	2	O2,O3,O8,O16,O19	\$43,950.14	\$43,678.07	\$34,653.44	\$272.06	\$9,296.70	0.62%	26.83%
	3	O6,O10	\$27,678.15	\$27,579.86	\$21,801.48	\$98.29	\$5,876.67	0.36%	26.96%
	4	O9,O12	\$36,254.00	\$36,217.95	\$28,992.37	\$36.05	\$7,261.63	0.10%	25.05%
	5	O11,O15,O17	\$35,737.51	\$35,575.79	\$28,692.54	\$161.71	\$7,044.96	0.45%	24.55%
	6	O13	\$34,066.75	\$34,066.75	\$26,666.12	\$-	\$7,400.63	0.00%	27.75%
5	1	O13	\$44,317.32	\$44,317.32	\$43,885.52	\$-	\$431.80	0.00%	0.98%
	2	O2,O3,O19,O16	\$34,665.43	\$34,435.14	\$34,575.73	\$230.29	\$89.70	0.67%	0.26%
	3	O6,O10	\$36,013.37	\$35,913.17	\$35,812.39	\$100.20	\$200.98	0.28%	0.56%
	4	O8	\$22,512.39	\$22,512.39	\$22,345.63	\$-	\$166.76	0.00%	0.75%
6	1	O13	\$23,815.91	\$23,815.91	\$13,702.19	\$-	\$10,113.72	0.00%	73.81%
	2	O13,O12	\$25,351.18	\$25,315.59	\$15,112.16	\$35.58	\$10,239.02	0.14%	67.75%
	3	O8,O2,O3,O19,O16	\$30,754.53	\$30,407.61	\$17,862.81	\$346.92	\$12,891.72	1.14%	72.17%
	4	O6,O10	\$19,342.07	\$19,248.61	\$11,238.74	\$93.47	\$8,103.33	0.49%	72.10%
	5	O7,O17,O11,O14,O4,O20,O15,O21,O1,O5,O18	\$60,774.66	\$60,087.48	\$36,568.85	\$687.19	\$24,205.81	1.14%	66.19%
7	1	O13	\$34,237.20	\$34,237.20	\$33,758.77	\$-	\$478.43	0.00%	1.42%
	2	O2,O3,O19,O16	\$26,731.62	\$26,489.40	\$26,597.77	\$242.22	\$133.86	0.91%	0.50%
	3	O6,O10	\$27,796.79	\$27,688.40	\$27,548.70	\$108.39	\$248.09	0.39%	0.90%
	4	O8	\$17,371.86	\$17,371.86	\$17,200.39	\$0.00	\$171.47	0.00%	1.00%
8	1	O4,O20,O5,O18	\$15,808.29	\$15,553.69	\$12,735.49	\$254.60	\$3,072.80	1.64%	24.13%
	2	O17	\$28,464.28	\$28,464.28	\$22,863.27	\$-	\$5,601.00	0.00%	24.50%
	3	O13	\$44,095.65	\$44,095.65	\$34,665.08	\$-	\$9,430.58	0.00%	27.20%
	4	O9,O12	\$47,065.04	\$47,021.48	\$37,654.82	\$43.56	\$9,410.22	0.09%	24.99%
	5	O2,O3,O8,O16,O19	\$56,922.54	\$56,704.15	\$45,033.22	\$218.39	\$11,889.32	0.39%	26.40%
	6	O6,O10	\$35,859.06	\$35,770.83	\$28,341.01	\$88.23	\$7,518.05	0.25%	26.53%
	7	O7,O11,O14,O15,O21,O1	\$68,618.57	\$68,302.69	\$55,247.72	\$315.88	\$13,370.85	0.46%	24.20%
9	1	O13	\$23,935.18	\$23,935.18	\$18,667.04	\$-	\$5,268.14	0.00%	28.22%

S	SB	Productores	Ganancias [millones de pesos COP]			Dif. en ganancias [millones de pesos COP]		%Ganancias	
			D1	D2	D3	Dif Gan E1: D1vsD2	Dif Gan E2: D1vsD3	%Gan E1: D1vsD2	%Gan E2: D1vsD3
	2	O9,O12,O17	\$40,714.53	\$40,672.38	\$32,640.71	\$42.15	\$8,073.82	0.10%	24.74%
	3	O2,O3,O8,O16,O19	\$30,861.73	\$30,533.86	\$24,264.12	\$327.87	\$6,597.61	1.07%	27.19%
	4	O6,O10	\$19,425.19	\$19,324.65	\$15,261.80	\$100.54	\$4,163.39	0.52%	27.28%
	5	O1,O4,O5,O7,O11,O14,O15,O18,O20,O21	\$45,495.69	\$44,792.15	\$36,616.96	\$703.54	\$8,878.73	1.57%	24.25%

Nota. Elaboración propia. Resuelto con AMPL® y MATLAB®