

Optimización sustentable de la distribución agrícola multiproducto en una Región del Centro de México

Sustainable optimization of multiproduct agricultural distribution in a Region of Central Mexico

Julio César Ayllon-Benítez^{1*} , Dora Ma. Sangerman-Jarquín² , María Magdalena Rojas-Rojas³ 

¹Tecnológico Nacional de México- TES Valle de Bravo. División de administración. Carretera Federal Valle de Bravo Km 30, Ejido San Antonio Laguna, CP. 51200. Valle de Bravo, Estado de México, México.

²Campo Experimental Valle de México-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carr. Los reyes- Texcoco km 13.5. CP. 56250. Texcoco, Estado de México, México.

³Universidad Autónoma Chapingo, Investigadora por México SECIHTI, Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Carr. México-Texcoco km. 38.5. CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: julio.ab@vbravo.tecnm.mx

Artículo científico

Recibido: 16 de enero 2026

Aceptado: 10 de abril 2026

RESUMEN. La distribución eficiente de alimentos es un componente clave para la sostenibilidad económica, social y ambiental de los sistemas agropecuarios, particularmente en áreas rurales con limitada articulación entre producción y consumo. El objetivo del estudio fue diseñar un esquema de programación de la distribución agrícola con enfoque de sustentabilidad, mediante un modelo de transporte multiproducto que permitiera identificar municipios superavitarios y deficitarios y asignar flujos óptimos al menor costo posible. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental, con información agrícola, demográfica y de mercado correspondiente al año 2020 para siete cultivos estratégicos en seis municipios del Distrito de Desarrollo Rural número 4, Tejupilco. Se formuló un modelo de programación lineal con una función objetivo de minimización y 133 restricciones: 42 de oferta y 91 de demanda para siete cultivos estratégicos, resuelto mediante el software LINGO. Los resultados mostraron un superávit regional de 73.3 mil toneladas, con una asignación óptima que prioriza el abastecimiento estatal antes del envío a mercados externos, con un costo mínimo de distribución de 23.6 millones de pesos. Se concluye que este modelo matemático multiproducto constituye una herramienta eficaz para mejorar el desempeño logístico, fortalecer la seguridad alimentaria y reducir impactos ambientales asociados al transporte, resultados alineados con la Agenda 2030. La originalidad radica en su aplicación territorial al considerar la heterogeneidad de cultivos en una región agrícola periférica, no obstante, al ser de carácter estático debe incorporar variaciones temporales de precios.

Palabras clave: Economía, logística, alimentos, agricultura, asignación.

ABSTRACT. Efficient food distribution is a key component of the economic, social, and environmental sustainability of agri-food systems, particularly in rural areas with limited integration between production and consumption. The objective of this study was to design a sustainability-oriented agricultural distribution scheduling scheme using a multiproduct transportation model to identify surplus and deficit municipalities and allocate optimal flows at the lowest possible cost. The research followed an applied approach with a quantitative, non-experimental design, using agricultural, demographic, and market data for the year 2020 covering seven strategic crops across six municipalities of Rural Development District No. 4, Tejupilco. A linear programming model was formulated with a cost-minimization objective function and 133 constraints: 42 supply constraints and 91 demand constraints for the seven strategic crops and solved using LINGO software. The results showed a regional surplus of 73.3 thousand tons, with an optimal allocation that prioritizes state-level supply before shipments to external markets, achieving a minimum distribution cost of 23.6 million Mexican pesos. It is concluded that this multiproduct mathematical model constitutes an effective tool to improve logistics efficiency, strengthen food security, and reduce environmental impacts associated with transportation, with outcomes aligned with the 2030 Agenda. The originality of the study lies in its territorial application and in accounting for crop heterogeneity in a peripheral agricultural region; however, due to its static nature, future extensions should incorporate temporal price variations.

Keywords: Economy, logistics, food, agriculture, allocation.

INTRODUCCIÓN

En 2020, la población de México ascendió a 126.01 millones de habitantes, de los cuales 13.5% se concentraron en el Estado de México (IGECEM 2021). El sistema de planeación agropecuaria nacional se organiza en 192 Distritos de Desarrollo Rural (DDR), siendo el DDR4 Tejupilco uno de los más relevantes del sur de la entidad, integrado por los municipios de Tejupilco, Temascaltepec, Tlatlaya, Luvianos, Amatepec y San Simón de Guerrero, donde reside 1.22% de la población estatal (SE 2023). Esta región presenta condiciones agroecológicas homogéneas favorables para la producción de granos, frutas y hortalizas, predominantemente bajo esquemas de temporal (Rosendo *et al.* 2019); sin embargo, la limitada transferencia tecnológica y la débil articulación entre producción y consumo han restringido su desempeño logístico (Orozco-Hernández *et al.* 2017), pese a que su productividad permite cubrir la demanda local y generar excedentes comercializables (Juan y Balderas 2018).

Desde una perspectiva logística y socioeconómica, el DDR4 Tejupilco constituye un caso de estudio relevante debido a su localización periférica, la dependencia del sector primario y las deficiencias en la vinculación territorial entre espacios de producción y mercados (Peña *et al.* 2015, Andrade y Castro 2018). Estas condiciones se traducen en mayores costos de transporte, pérdidas poscosecha y vulnerabilidad en el abastecimiento local de alimentos (Flores 2021), lo que hace necesario el uso de herramientas analíticas para optimizar la asignación espacial de la producción agrícola y fortalecer la seguridad alimentaria regional. Se ha señalado que los problemas técnicos de producción y logística generan sistemas de distribución ineficientes (Aguilar 2021), mientras que los modelos de optimización contribuyen a mejorar la seguridad alimentaria y la eficiencia del sistema agroalimentario (Ahumada y Villalobos 2011, Torres y Rojas 2018). Estos enfoques se alinean con la Agenda 2030, particularmente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 2, que promueve la agricultura sostenible y el acceso equitativo a los alimentos (ONU y CEPAL 2018, Torres y Rojas 2018, Ramírez *et al.* 2020a, Bhattacharjee *et al.* 2021). En contextos rurales, cuando la producción supera las necesidades de autoconsumo, la canalización de excedentes hacia los mercados requiere cadenas de suministro capaces de integrar objetivos económicos, ambientales y sociales (Galal y El-Kilany 2016).

En las últimas dos décadas, la sostenibilidad se ha consolidado como eje central en el diseño de cadenas agroalimentarias (Barbosa-Póvoa *et al.* 2018), donde las decisiones de localización, ruteo y asignación de flujos afectan tanto la rentabilidad como la huella ambiental y la resiliencia del sistema alimentario (Christopher y Peck 2004, Béné 2020, Wang *et al.* 2024). Desde la investigación operativa, se han desarrollado modelos de optimización que incorporan criterios de sostenibilidad (Wang *et al.* 2016) mediante funciones objetivo múltiples o restricciones ambientales y sociales (Esmaeilian *et al.* 2020), permitiendo reducir costos, emisiones y riesgos logísticos (Springmann *et al.* 2018, Jayarathna *et al.* 2021). Dado que las etapas de transporte y distribución concentran una proporción significativa de las emisiones del sistema alimentario global (Crippa *et al.* 2021, Anastasiadis y Tsolakis 2021, Tubiello *et al.* 2021), la optimización logística adquiere relevancia estratégica.

En América Latina y particularmente en México, la ineficiencia logística y los altos costos de transporte continúan siendo barreras para la competitividad agropecuaria (CEPAL 2004). Estudios previos han aplicado modelos de transporte multiproducto para cultivos específicos, como cacao, guayaba y tuna, demostrando reducciones significativas en los costos de distribución mediante programación lineal (Quintero *et al.* 2016, Rivera *et al.* 2019, Granillo *et al.* 2019). No obstante, persiste una brecha empírica en la aplicación de estos modelos a regiones rurales periféricas, a escala municipal y distrital, donde los desequilibrios territoriales y la heterogeneidad productiva demandan enfoques integrales. Estudios de balances oferta-demanda de productos agrícolas destacan la dependencia de importaciones y la concentración productiva en ciertas regiones (Ramírez *et al.* 2020b).

En este contexto, el presente estudio aporta evidencia para una región agrícola periférica, mostrando cómo un modelo de transporte multiproducto puede utilizarse como herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la logística agroalimentaria sostenible en el sur del Estado de México, tal como propone la literatura reciente en diseño de cadenas de suministro sostenibles (Govindan y Hasanagic 2018). El objetivo de la investigación fue diseñar un esquema de programación de la distribución agrícola con enfoque de sostenibilidad, que permita identificar municipios superavitarios y deficitarios y determinar la asignación óptima de flujos al menor costo posible. Se planteó como hipótesis que la optimización basada en costos proporcionales a carga-distancia contribuye a reducir los costos logísticos y las desigualdades territoriales en el acceso a los alimentos, fortaleciendo la eficiencia y sostenibilidad del sistema agroalimentario regional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Estado de México se sitúa en el centro del país, rodeado por Ciudad de México (CDMX), colinda con Querétaro e Hidalgo (norte), Guerrero, Morelos y Michoacán (sur y suroeste), Puebla y Tlaxcala (este), ubicándose el DDR4 al sur de la entidad, integrado por Amatepec, Luvianos, San Simón de Guerrero, Tejupilco, Temascaltepec y Tlatlaya, caracterizado por su condición periférica respecto a los principales centros económicos del país. La configuración territorial predominantemente es rural, con elevada dependencia del sector agropecuario y una estructura productiva basada en sistemas de temporal. La región posee una relativa homogeneidad agroecológica, asociada a condiciones climáticas y edáficas favorables para producir granos básicos, frutales y hortalizas, lo que permite una oferta agrícola diversificada a escala municipal (Salas 2017, GEM 2022) (Figura 1).

Metodología

Se realizó un estudio de enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y diseño no experimental, utilizando información censal y administrativa oficial correspondiente al año 2020. La unidad de análisis fue el municipio-producto, considerando siete cultivos estratégicos y su relación de oferta y demanda en los que integran el DDR4 Tejupilco. El año 2020 se seleccionó por ser el periodo más reciente con información completa y homogénea disponible en las fuentes oficiales, lo que garantiza consistencia y comparabilidad en los cálculos realizados. El modelo se formuló con base en Ayllon *et al.* (2015) y Ramírez *et al.* (2023), solucionándolo con el software Linear Generalize Optimizer

(LINGO) versión 18.0, con datos de 2020. Para la población de México (126.01 millones de habitantes) y el DDR4, Tejupilco, Temascaltepec, Tlatlaya, Luvianos, Amatepec y San Simón de Guerrero (79.28, 35.01, 31.76, 28.82, 25.24 y 6.69 miles de habitantes cada uno) se consultó el Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México. Para determinar lugares superavitarios y deficitarios, se calculó el Consumo Nacional Aparente (CNA), el cual consideró la producción nacional y el saldo comercial de las fracciones arancelarias de acuerdo con la Secretaría de Economía (SE): maíz grano blanco (10059004), aguacate (08044001), tomate verde (07020002), caña de azúcar (12129301), guayaba (08044002), durazno (08093003) y calabacita (07099301). En el caso del maíz, se restó a la producción el 22.3 y 2.2% para uso pecuario y semilla. Para el consumo per cápita se dividió el CNA entre la población nacional total; consumo per cápita: $[CNA / población\ total]$, mientras para el local se multiplicó el consumo per cápita por el número de habitantes de cada lugar: consumo local = $[(consumo\ per\ cápita) (población\ municipal)]$.



Figura 1. Municipios del Distrito de Desarrollo Rural 4 Tejupilco, región sur del Estado de México. Fuente: elaboración propia con base a INEGI (2023).

Los costos totales (CT) se obtuvieron de investigación literaria (Rohmer *et al.* 2019), de campo y la página electrónica de una empresa de servicio de carga (Transportes Avancarga S. A de C. V) para determinar de acuerdo con una matriz de distancias origen destino: $tarifa = [2\ 600 + 18(D)]$, donde 2 600 (costos fijos) es el costo de un envío local, 18 (costos variables) es el costo por kilómetro (km) recorrido cuando el flete local rebase los 30 km, D es distancia. Al CT se agregó el impuesto al valor agregado (IVA) de 16%, para dividir entre 18 (capacidad de camión) y obtener el costo real por tonelada (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de distancias (km) y costo pesos por tonelada (\$ t-1) origen-destino (SCT 2023).

Origen/Destino (distancia km)	Amatepec	Luvianos	San Simón de Guerrero	Tejupilco	Temascaltepec	Tlatlaya	DDR1 Toluca	DDR2 Zumpango	DDR3 Texcoco	DDR5 Atlacomulco	DDR7 Valle de Bravo	DDR8 Jilotepec	CEDA CDMX
Amatepec	1	59	67	38	69	12	135	252	235	205	99	281	214
Luvianos	59	1	54	24	64	69	126	239	222	192	86	268	231
San Simón de Guerrero	67	54	1	31	15	79	76	188	184	144	44	217	161
Tejupilco	38	24	31	1	33	50	100	215	198	162	62	244	188
Temascaltepec	69	64	15	33	1	82	67	179	162	136	30	208	152
Tlatlaya	12	69	79	50	82	1	151	264	247	217	111	293	221
Origen\Destino (costo \$ t ⁻¹)													
Amatepec	168.72	236.00	245.28	211.64	247.60	181.48	324.16	459.88	440.16	405.36	282.40	493.52	415.80
Luvianos	236.00	168.72	230.20	195.40	241.80	247.60	313.72	444.80	425.08	390.28	267.32	478.44	435.52
San Simón de Guerrero	245.28	230.20	168.72	203.52	184.96	259.20	255.72	385.64	381.00	334.60	218.60	419.28	354.32
Tejupilco	211.64	195.40	203.52	168.72	205.84	225.56	283.56	416.96	397.24	355.48	239.48	450.60	385.64
Temascaltepec	247.60	241.80	184.96	205.84	168.72	262.68	245.28	375.20	355.48	325.32	202.36	408.84	343.88
Tlatlaya	181.48	247.60	259.20	225.56	262.68	168.72	342.72	473.80	454.08	419.28	296.32	507.44	423.92

Formulación del modelo en forma extendida

A continuación, se presenta la formulación matemática completa del modelo de transporte multiproducto, tanto en su forma extendida como compacta, con el fin de asegurar claridad en la notación, reproducibilidad del modelo y consistencia con los estándares internacionales. El diseño del modelo de la forma extendida se representa de la siguiente manera:

$$MIN Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_{ij} * X_{ijk}$$

$$MIN Z = C_{11}X_{111} + C_{12}X_{121} + C_{13}X_{131} \dots \dots \dots C_{IJ}X_{IJK}$$

Sujeto a

Oferta:

$$\begin{aligned} X_{111} + X_{121} + X_{131} \dots X_{1JK} &\geq O_{11} \\ X_{211} + X_{221} + X_{231} \dots X_{2JK} &\geq O_{21} \\ &\dots \dots \\ X_{I1K} + X_{I2K} + X_{I3K} \dots X_{IJK} &\geq O_{IK} \end{aligned}$$

Demanda:

$$\begin{aligned} X_{111} + X_{211} + X_{311} \dots X_{I1K} &\leq D_{11} \\ X_{121} + X_{221} + X_{321} \dots X_{I2K} &\leq D_{21} \\ &\dots \dots \\ X_{1JK} + X_{2JK} + X_{3JK} \dots X_{IJK} &\leq D_{JK} \end{aligned}$$

Lógicas o de no negatividad:

$$X_{ijk} \geq 0$$

Formulación del modelo en forma compacta

El modelo de forma compacta se representa de la siguiente manera (FO)

$$MIN Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_{ij} * X_{ijk}$$

Sujeto a:

Oferta:

$$\sum_{j=1}^J X_{ijk} \geq O_{ik}; \quad \forall i, k \text{ (42 restricciones)}$$

Demanda:

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} \leq D_{jk}; \quad \forall j, k \text{ (91 restricciones)}$$

Lógicas o de no negatividad:

$$X_{ijk} \geq 0$$

Para los dos casos en particular, donde: FO= función objetivo; $i=1,2\dots I=6$ orígenes (1: Amatepec, 2: Luvianos, 3: San Simón de Guerrero, 4: Tejupilco, 5: Temascaltepec y 6: Tlatlaya); $j=1,2\dots J=13$ destinos (1: Amatepec, 2: Luvianos, 3: San Simón de Guerrero, 4: Tejupilco, 5: Temascaltepec, 6: Tlatlaya, 7: DDR1 Toluca, 8: DDR2 Zumpango, 9: DDR3 Texcoco, 10: DDR5 Atlacomulco, 11: DDR7 Valle de Bravo, 12: DDR8 Jilotepec y 13: central de abasto [CEDA], ciudad de México [CDMX]); $k=1,2\dots K=7$ tipo de producto (1: maíz grano blanco, 2: aguacate, 3: tomate verde, 4: caña de azúcar, 5: guayaba, 6: durazno y 7: calabacita); C_{ij} = costo de transporte unitario entre el origen i y el destino j ; O_{ik} : oferta en el origen i del producto k ; D_{jk} : demanda en el destino j del producto k ; X_{ijk} : variable de decisión de las toneladas a transportar del origen i hacia el destino j del producto k .

La FO del problema planteado busca la minimización del costo total de transporte desde múltiples fuentes hacia diversos destinos, estando implicado el precio unitario y cantidad de mercancía transportada (expresiones 1 y 5). El número total de variables fue de 546, resultado de los orígenes, destino y tipo de productos. Las 42 restricciones asociadas a la oferta establecieron que el volumen de producto enviado desde cada origen hacia los distintos destinos no puede exceder la producción disponible en dicho centro de procedencia (expresiones 2 y 6). Las 91 restricciones relacionadas con la demanda garantizan que la cantidad de artículos surtidos a cada destino satisfaga al menos su requerimiento (expresiones 3 y 7). Por último, se incorpora la condición de no negatividad en el modelo, con el propósito de impedir resultados negativos que carezcan de interpretación económica (expresiones 4 y 8). Asimismo, este modelo matemático de optimización permite integrar criterios de sostenibilidad, al planificar la logística y redes de distribución, traducándose en menores impactos ambientales y huella ecológica del transporte de bienes y servicios (Jouzani y Govindan 2021). En otros contextos se han incorporado costos de conservación de frescura en problemas de ruteo de productos agrícolas perecederos (Zhu *et al.* 2021), lo que abre la posibilidad de extender el modelo hacia criterios adicionales de calidad del producto.

RESULTADOS

Los resultados evidencian estructura agroproductiva regional superavitaria, con asimetrías territoriales entre municipios del DDR4 Tejupilco. El balance oferta-demanda, identificó que cinco de los seis municipios presentaron excedentes en al menos uno de los productos analizados, mientras que Tejupilco concentró los principales déficits en maíz, aguacate, tomate verde, caña de azúcar, guayaba y durazno. La Tabla 2, muestra el saldo comercial de los productos como: grano básico, el maíz blanco obtuvo 24.4 millones de toneladas, donde las exportaciones representaron 3.9% y las importaciones 2.5% de la misma, dando un consumo per cápita de 190.7 kg. A nivel regional, se presentó superávit de 39.1 mil toneladas por cinco municipios: Tlatlaya (37.3%), Amatepec (35.6%), Luvianos (23.2%), Temascaltepec (3.6%) y San Simón de Guerrero (0.3%).

Tabla 2. DDR4 Tejupilco, Estado de México, oferta y demanda en toneladas (t).

Municipio y variable	Producto						
	Maíz	Aguacate	Tomate verde	Caña de Azúcar	Guayaba	Durazno	Calabacita
Amatepec							
Producción	24 525	724	0	0	0	242	0
Consumo	10 579	202	126	25	50	38	8
Disponibilidad †	13 945	522	-126	-25	-50	204	-8
Luvianos							
Producción	18 939	970	5 151	0	20	0	363
Consumo	9 849	231	144	29	58	43	9
Disponibilidad †	9 090	739	5 007	-29	-38	-43	354
San Simón de Guerrero							
Producción	1 748	2 597	0	0	88	70	0
Consumo	1 635	54	33	7	13	10	2
Disponibilidad †	113	2 543	-33	-7	75	60	-2
Tejupilco							
Producción	17 755	457	96	38	39	7	24
Consumo	18 640	634	396	79	159	119	24
Disponibilidad†	-885	-177	-300	-41	-120	-112	0
Temascaltepec							
Producción	10 228	14 823	106	8 019	1 555	655	94
Consumo	8 820	280	175	35	70	53	11
Disponibilidad†	1 408	14 543	-69	7 984	1 485	602	83
Tlatlaya							
Producción	26 926	0	0	35	0	0	0
Consumo	12 344	254	159	32	64	48	10
Disponibilidad†	14 543	-254	-159	3	-64	-48	-10
TOTAL	39 140	18 348	5 007	7 987	1 559	866	437

Nota: †Superávit (+) y déficit (-).

En el caso de frutas: la producción nacional de aguacate se mantuvo en 2.4 millones de toneladas, representando las exportaciones el 56.24% de la misma, para obtener un consumo individual de 8.3

kg. A nivel local, con estos antecedentes se obtuvo una disponibilidad de 18.3 mil toneladas por cuatro municipios: Temascaltepec (79.3%), San Simón de Guerrero (13.9%), Luvianos (4.0%) y Amatepec (2.8%). En el país, la producción de caña de azúcar fue de 111.1 mil toneladas, mostrando las exportaciones e importaciones 0.7 y 0.02% respectivamente de la producción, para lograr un consumo por sujeto de 1 kg. A nivel territorial, Temascaltepec dispuso de mayor porcentaje para ofrecer a otros 7.9 mil toneladas y en menor cantidad Tlatlaya con 3 t. En el cultivo de guayaba, la nación produjo 287.2 mil toneladas, donde las exportaciones fueron 3.6% de la producción, para conseguir un consumo por persona de 2.2 kg. A nivel particular, existió un residual de 1.5 mil toneladas, por dos municipios: Temascaltepec (95.3%) y San Simón de Guerrero (4.7%). En la producción de durazno en México se lograron 173.0 mil toneladas, con importaciones de 9.9% y exportaciones de 3.8% resultado de esta, para obtener un consumo per cápita de 1.5 kg. A nivel regional, la disponibilidad fue de 866 t distribuidas en Temascaltepec (69.5%), Amatepec (23.6%) y San Simón de Guerrero (6.9%) (Tabla 2).

Respecto a hortalizas: la producción de tomate verde, en México se obtuvieron 0.7 mil toneladas, figurando las exportaciones en 21.8% de la misma, para arrojar un consumo por individuo de 4.8 kg. A nivel municipal, se obtuvo un exceso de oferta de 5.0 mil toneladas, siendo Luvianos quien representó el 100%. Respecto a calabacita, la nación alcanzó las 0.5 mil toneladas, donde las exportaciones e importaciones representaron 93.3% y 0.3% de la producción obtenida, para alcanzar un consumo personal de 0.3 kg. A nivel local, se obtuvo un excedente de 0.4 mil toneladas, siendo el principal Luvianos (81.0%) y Temascaltepec (19.0%). El DDR4 es autosuficientes en la mayoría de los productos agrícolas, excepto Tejupilco, mientras los cinco municipios restantes presentaron superávit en maíz, seguido del aguacate, menos Tlatlaya. En tomate verde, Luvianos es el único que puede hacer envíos, siendo la misma situación la de Temascaltepec en caña de azúcar. En guayaba, sobresalen con excesos Temascaltepec y San Simón de Guerrero, mientras que en durazno Temascaltepec, Amatepec y San Simón de Guerrero. La calabacita es excedentaria en Luvianos y Temascaltepec (Tabla 2).

En el caso del maíz blanco, cultivo base de la dieta y del sistema productivo regional, se registró un superávit total de 39.1 mil toneladas, generado principalmente por Tlatlaya, Amatepec y Luvianos, los cuales aportan más del 95% del excedente regional. Este volumen permite cubrir completamente el déficit de Tejupilco y abastecer de manera significativa al DDR1 Toluca, consolidando al DDR4 como una región estratégica para el suministro estatal de grano básico.

Respecto a los cultivos frutícolas, el aguacate mostró un excedente regional de 18.3 mil toneladas, concentrado de manera dominante en Temascaltepec y San Simón de Guerrero, mientras que la guayaba y el durazno presentaron superávits más moderados, pero relevantes para la diversificación productiva y el abastecimiento regional. En estos casos, la solución óptima priorizó la asignación hacia destinos estatales deficitarios, minimizando envíos a mercados externos y reduciendo distancias promedio de transporte. En el grupo de hortalizas, el tomate verde y la calabacita exhibieron excedentes concentrados casi exclusivamente en Luvianos y Temascaltepec, configurando nodos especializados dentro de la red de distribución. Esta concentración productiva permitió una asignación eficiente hacia municipios deficitarios del propio DDR4 y, en menor medida, hacia otros distritos del Estado de México.

La Tabla 3 presenta la estructura de demanda correspondiente a otros DDR del Estado de México y a la CEDA de la Ciudad de México, los cuales fueron incorporados como destinos externos al DDR4 Tejupilco dentro del model. Estas asignaciones representaron mercados deficitarios a escala estatal y metropolitana, donde en particular, los DDR: Toluca, Zumpango y Texcoco concentran elevados requerimientos de maíz y productos hortofrutícolas, reflejando su mayor densidad poblacional y especialización económica no agrícola, mientras que DDR como: Atlacomulco, Valle de Bravo y Jilotepec muestran demandas más acotadas, asociadas a su menor tamaño relativo o a una estructura productiva parcialmente autosuficiente. La incorporación de estos permitió analizar escenarios de asignación óptima en los que se priorizo el abastecimiento estatal antes del envío de remanentes a la CEDA, contribuyendo a una evaluación integral de la eficiencia logística y de la sostenibilidad territorial del sistema de distribución agrícola.

Tabla 3. Otros destinos demandantes del Estado de México (DDR y CEDA) en toneladas (t).

DDR y CEDA	Producto						
	Maíz	Aguacate	Tomate verde	Caña de azúcar	Guayaba	Durazno	Calabacita
DDR1 Toluca	326 154	31 335	21 405	4 281	8 562	6 420	486
DDR2 Zumpango	979 314	46 457	28 925	5 807	11 614	8 638	1 630
DDR3 Texcoco	1 005 214	47 043	1 051	6 283	12 565	9 186	
DDR5 Atlacomulco			6 920		865	1 730	1 272
DDR7 Valle de Bravo						128	
DDR8 Jilotepec		2 127	1 329	266	532	313	80
CEDA CDMX	-	-	-	-	-	-	-

La solución óptima: 73.3 mil toneladas superavitarias, repartidas en maíz 53.4%, aguacate 25.0%, caña de azúcar 10.9%, tomate verde 6.8%, guayaba 2.1 %, durazno 1.2% y calabacita 0.6%. De la misma cantidad excedente, 64.1 mil toneladas (87.4%) son distribuidas entre los destinos deficitarios, mientras 9.2 mil toneladas (12.6%) son enviadas a la CEDA. La FO resultante fue de 23.6 millones de pesos (mdp) a precios constantes de los cuales Temascaltepec participa con 7.2 mdp (30.6%), Tlatlaya 5.7 mdp (24.0%), Amatepec 5.1 mdp (21.5%), Luvianos 4.9 mdp (20.7%) y San Simón de Guerrero 0.8 mdp (3.3%). Del costo total de transporte de la distribución, el maíz participó con 13.9 mdp (58.9%), aguacate 4.9 mdp (20.9%), caña de azúcar 2.4 mdp (10.2%), tomate verde 1.7 mdp (6.8%), guayaba 0.4 mdp (1.7%), durazno 0.2 mdp (0.9%) y calabacita 0.1 mdp (0.6%) (Tabla 4).

La solución del modelo de transporte multiproducto arrojó un superávit regional total de 73.3 mil toneladas, de las cuales 87.4% se distribuyen dentro del Estado de México y solo 12.6% se destinan a la CEDA, lo que refleja una priorización del abastecimiento estatal frente a mercados externos. Esta asignación es consistente con un enfoque de sostenibilidad territorial, al reducir recorridos de larga distancia y fortalecer circuitos regionales de comercialización. El costo mínimo total de distribución asociado a esta asignación óptima fue de 23.6 millones de pesos, siendo el maíz el producto con mayor participación en el costo total (58.9%), seguido del aguacate (20.9%) y la caña de azúcar (10.2%). A nivel municipal, Temascaltepec y Tlatlaya concentraron más del 54% del costo total, lo cual se explica por su elevado volumen de oferta y su papel como principales nodos de origen dentro de la red logística (Tabla 4).

Tabla 4. DDR4 Tejupilco, Estado de México. Distribución óptima en toneladas (t).

Producto	Origen	Destino y cantidad	Total
Maíz	Amatepec	DDR1 Toluca (13 945)	13 945
	Luvianos	DDR1 Toluca (8 205) y Tejupilco (885)	9 090
	San Simón de Guerrero	DDR1 Toluca (113)	113
	Temascaltepec	DDR1 Toluca (1 408)	1 408
	Tlatlaya	DDR1 Toluca (8 942) y CEDA (5 641)	14 583
Aguacate	Amatepec	DDR1 Toluca (268) y Tlatlaya (254)	522
	Luvianos	DDR1 Toluca (563) y Tejupilco (177)	740
	San Simón de Guerrero	DDR1 Toluca (2 543)	2 543
	Temascaltepec	DDR1 Toluca (14 543)	14 543
Tomate verde	Luvianos	DDR1 Toluca (4 319), Tejupilco (301), Tlatlaya (159), Amatepec (126), Temascaltepec (69) y San Simón de Guerrero (33)	5 007
Caña de azúcar	Temascaltepec	DDR1 Toluca (4 281), CEDA (3 603), Tejupilco (42), Luvianos (29), Amatepec (22) y San Simón de Guerrero (7)	7 984
	Tlatlaya	Amatepec (3)	3
Guayaba	San Simón de Guerrero	Luvianos (38) y Tlatlaya (36)	74
	Temascaltepec	DDR1 Toluca (1 287), Tejupilco (120), Amatepec (50) y Tlatlaya (28)	1 485
Durazno	Amatepec	Tejupilco (112), Tlatlaya (48) y Luvianos (43)	203
	San Simón de Guerrero	DDR1 Toluca (60)	60
	Temascaltepec	DDR1 Toluca (475) y DDR7 Valle de Bravo (128)	603
Calabacita	Luvianos	DDR1 Toluca (334), Tlatlaya (10), Amatepec (8) y San Simón de Guerrero (2)	354
	Temascaltepec	DDR1 Toluca (83)	83
Total			73 344

En términos operativos, la distribución óptima implicó el uso estimado de 4 075 camiones, lo que pone de manifiesto la magnitud logística del sistema agroalimentario regional y el potencial impacto que una mejor coordinación de flujos puede tener sobre la reducción de viajes innecesarios, costos de transporte y emisiones asociadas. En conjunto, los resultados muestran que el DDR4 Tejupilco es autosuficiente en la mayoría de los cultivos analizados, con capacidad para abastecer tanto su demanda interna como la de otros distritos del Estado de México. Al mismo tiempo, la identificación de Tejupilco como nodo deficitario dentro de una región globalmente superavitaria revela la importancia de la planificación logística para corregir desbalances territoriales y mejorar la eficiencia del sistema agroalimentario regional (Tabla 4).

En la Tabla 4 sintetiza la solución óptima del modelo de transporte multiproducto, mostrando la asignación de flujos entre municipios de origen y destinos finales para cada uno de los cultivos analizados. Los resultados evidencian que la redistribución de excedentes se concentra principalmente hacia destinos estatales deficitarios, particularmente el DDR1 Toluca, el cual actúa como principal receptor de productos básicos y hortofrutícolas, mientras que la CEDA de la Ciudad de México participa únicamente como destino residual. Esta configuración refleja una priorización

del abastecimiento regional y estatal frente a mercados externos, coherente con un enfoque de sostenibilidad territorial, al favorecer circuitos de comercialización más cortos, reducir distancias promedio de transporte y disminuir potenciales impactos ambientales asociados a la movilización de alimentos.

Asimismo, la solución identifica a Temascaltepec, Tlatlaya, Amatepec y Luvianos como nodos estratégicos de oferta dentro de la red logística, debido a su mayor disponibilidad productiva y su papel en la articulación de flujos multiproducto. En conjunto, la asignación óptima obtenida permite minimizar el costo total de transporte y reducir recorridos innecesarios, aportando evidencia sobre la utilidad de los modelos de optimización espacial para fortalecer la eficiencia logística y la seguridad alimentaria en regiones agrícolas periféricas.

DISCUSIÓN

El costo óptimo por toda la distribución fue de 23.6 millones de pesos, el cual puede interpretarse como una frontera de eficiencia logística desde la cual evaluar diferentes escenarios de sostenibilidad, donde la adopción de tecnologías de transporte menos intensivas en carbono (biocombustibles derivados de residuos agrícolas, vehículos más eficientes o electrificación progresiva de la flota) podría incrementar el costo monetario en el corto plazo, pero reducir la huella de carbono del sistema (Yao *et al.* 2022), lo cual es consistente con las trayectorias de descarbonización propuestas para el transporte de alimentos a nivel global (Chen *et al.* 2021, 2025). El modelo presentado constituye una base sobre la cual incorporar estos escenarios en análisis posteriores.

El número de habitantes de Tejupilco origina mayor consumo, aunado a la concentración de la economía en servicios (Gabino y Muñoz 2022), siendo factores para no generar sobreoferta, mientras que en lugares restantes del DDR4, el sector primario es base de su economía. El Estado de México, presenta dificultades en comercialización y transportación (20.9 y 9.6% de las unidades de producción) (INEGI 2022). Tener precios reales de transporte según tamaño de unidad empleada (Ramírez *et al.* 2023) y asociación de productores para traslados que permitan menores viajes, disminuyen costos de transferencia al consumidor y garantizan el objetivo 2 de la Agenda 2030 de acceso a alimentos. Los resultados muestran que la región es autosuficiente en la mayoría de los productos analizados, con un superávit de 73.3 mil toneladas y una asignación óptima de flujos que prioriza el abastecimiento del propio Estado de México antes de enviar remanentes a la CEDA. Esta configuración no sólo minimiza el costo monetario de transporte, sino que también tiende a reducir el volumen total de toneladas-kilómetro recorridas, lo cual tiene implicaciones positivas sobre el sistema de distribución, dado que las emisiones de la movilización dependen críticamente de distancias, tonelaje y tipo de combustible utilizado (Rabbi 2025).

Desde la perspectiva de la toma de decisiones, el modelo ofrece información accionable para productores, acopiadores y empresas agroalimentarias de la región: al identificar nodos con alta disponibilidad (por ejemplo, Temascaltepec en aguacate y caña de azúcar, mientras Luvianos en tomate verde y calabacita), se pueden diseñar estrategias de consolidación de carga y de cooperación entre unidades productivas que mejoren la ocupación de los camiones, reduzcan viajes

vacíos y generen economías de escala en transporte. Este tipo de coordinación ha sido señalado en la literatura reciente, como un factor crítico para aumentar la resiliencia y sostenibilidad de las cadenas agroalimentarias (Madani y Abdelfatah 2024) frente a choques económicos, climáticos y logísticos (Yontar y Ersöz 2020).

Otro resultado relevante es la identificación de Tejupilco como municipio deficitario a pesar de encontrarse dentro de un distrito globalmente superavitario. Desde la óptica de la sostenibilidad y la política pública, ello sugiere la necesidad de decisiones estratégicas para reequilibrar la red mediante inversiones selectivas en almacenamiento, infraestructura carretera o mecanismos de inversión pública local, de modo que los excedentes de los municipios vecinos se canalicen de forma más eficiente y con menores pérdidas. En este sentido, Parmaksız *et al.* (2024) aportan a la literatura sobre diseño de redes de suministro agroalimentarias sostenibles, subrayando la importancia de combinar instrumentos de mercado (contratos, precios garantizados) con decisiones de planificación territorial e inversión pública para lograr sistemas más inclusivos y ambientalmente responsables (Pishvaei y Razmi 2012). Estos resultados son coherentes con el enfoque de sostenibilidad económica, social, ambiental e institucional propuesto para la logística rural.

Principalmente los pequeños agricultores desconocen los métodos o herramientas logísticas para reducir costos, obtener rentabilidad y satisfacer clientes; sin embargo, al implementarlo agregan valor a los procesos y son competitivos al reducir costos (Vargas *et al.* 2022), como los modelos de transporte multiproducto (Estrada *et al.* 2018), los cuales son fundamentales para comercializar eficientemente la producción; no obstante, su efectividad depende de datos precisos sobre precios y capacidades, como el modelo matemático de asignación multiproducto de lácteos desarrollado por Herrera *et al.* (2020), en el cual lograron disminuir en 6 y 10% los costos operativos totales y de transporte respectivamente, donde este último factor, en regiones de Latinoamérica es considerado una barrera por su alto valor monetario e ineficiencia, el cual constantemente demanda mejoras en infraestructura y mayor colaboración entre productores para aminorarlos. La autosuficiencia regional observada, excepto en Tejupilco, resalta la necesidad de políticas que garanticen la seguridad alimentaria mediante una distribución sostenible, en consonancia con los objetivos de la Agenda 2030, pudiendo ser complementados con inversiones en infraestructura y políticas públicas para reducir costos y mejorar la competitividad en el sector, con enfoque de economía circular (Quiroz-Flores *et al.* 2024), donde este tipo de modelos evolucionen hacia esquemas que integren criterios de sostenibilidad.

CONCLUSIONES

El estudio alcanzó su objetivo al implementar un modelo de transporte multiproducto orientado a optimizar la distribución agrícola en el DDR4 Tejupilco, permitiendo identificar nodos superavitarios y deficitarios y asignar flujos al menor costo. Los resultados mostraron un superávit de 73.3 mil toneladas, del cual 87.4% se reorientó hacia destinos dentro del Estado de México y 12.6% hacia la CEDA, con un costo mínimo de distribución de 23.6 millones de pesos. El ajuste del modelo evidenció mejoras en eficiencia logística, reducción de distancias y fortalecimiento del

abastecimiento estatal, lo que valida la utilidad de la optimización espacial como herramienta analítica para la gestión agroalimentaria en regiones agrícolas periféricas. Estos hallazgos contribuyen al entendimiento de los procesos de distribución territorial debido a que ofrecen elementos operativos para apoyar estrategias de seguridad alimentaria y toma de decisiones en política pública.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor, agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), la beca de estancia posdoctoral.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Andrade GJA, Castro DP (2018) Redes migratorias en el mercado de trabajo de la floricultura en el Estado de México. *Revista de Antropología Social* 27: 145-168. <https://doi.org/10.5209/RASO.59436>
- Aguilar GG (2021) Crisis económica, hambre y desperdicio en México. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Ed. Miguel Ángel Porrúa. Ciudad de México. 114p.
- Ahumada O, Villalobos JR (2011) A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research* 190(1): 339-358. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0614-4>.
- Anastasiadis F, Tsolakis N (2021) Environmental hotspots analysis: A systematic framework for food supply chains and implementation case in the UK poultry industry. *Journal of Cleaner Production* 305: 126981. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126981>.
- Ayllon BJC, Omaña JM, Sangerman DM, Garza, LE, Quintero JM, González RF (2015) Modelo de transporte para la minimización de costos de distribución de tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(7): 1615-1628. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.554>
- Barbosa-Póvoa A, da Silva C, Carvalho A (2018) Opportunities and challenges in sustainable supply chains. *European Journal of Operational Research* 268(2): 399-431. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036>
- Béné C (2020) Resilience of local food systems and links to food security: A review of some important concepts in the context of COVID-19 and other shocks. *Food Security* 12: 805-822. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01076-1>
- Bhattacharjee L, Seki R, Ashraf M, Tontisirin K (2021) Nutrition-sensitive food systems: Brief perspectives. *Bangladesh Journal of Nutrition* 34: 25-39. <https://doi.org/10.3329/bjnut.v34i1.69993>
- CEPAL (2004) Infraestructura, transporte e integración. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/1cbc8c12-a56e-4c05-8c68-22ea4c6992e1/content>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2025.
- Chen W, Jafarzadeh S, Thakur M, Ólafsdóttir G, Mehta S, Bogason S, Holden N (2021) Environmental impacts of animal-based food supply chains with market characteristics. *Science of The Total Environment* 783: 147077. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147077>

- Chen Z, Song J, Yang W, Xing J, Liu C, Wang X (2025) Global food transportation decarbonization. *Communications Earth y Environment* 6: 1-13. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02891-0>
- Christopher M, Peck H (2004) Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management* 15(2): 1-14. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>
- Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, Monforti-Ferrario F, Tubiello FN, Leip A (2021) Food systems and GHG emissions. *Nature Food* 2: 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Esmaeilian B, Sarkis J, Lewis K, Behdad S (2020) Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, Conservation and Recycling* 163: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064>
- Estrada CME, Portillo VM, Félix GL, Vargas AI, Medina CSE (2018) Balance oferta-demanda de maíz (*Zea mays* L.) en México con programación lineal. *Semestre Económico* 7: 103-130. <https://doi.org/10.26867/se.2018.v07i1.75>
- Flores C (2021) Gestión de la cadena de suministro en la comercialización de productos agrícolas en Ecuador. *SUMMA. Revista disciplinaria en Ciencias Económicas y Sociales* 3(2): 1-23. <https://www.doi.org/10.47666/summa.3.2.38>
- Gabino MF, Muñoz A (2022) Desarrollo local en el suroeste del Estado de México. *Terra* 11: 60-88. <https://doi.org/10.7203/terra.11.25393>
- Galal N, El-Kilany K (2016) Sustainable Agri-Food supply chain with uncertain demand and lead time. *International Journal of Simulation Modelling* 15: 485-496. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(3\)8.350](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(3)8.350)
- GEM (2022) Plan de Desarrollo Municipal 2022-2024. Gobierno del Estado de México. Edición del Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de México. Toluca, Estado de México. <https://copladem.edomex.gob.mx>. Fecha de consulta: 13 de enero de 2025.
- Govindan K, Hasanagic M (2018) A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: A supply chain perspective. *International Journal of Production Research* 56(2): 278-311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141>
- Granillo MR, González IJ, Santana F y Martínez JL (2019) Centros de consolidación para tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 265-276. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.790>
- Herrera OOJ, Bedoya PPA y Obando RNY (2020) Modelo matemático de asignación multiproducto para la distribución de lácteos. *Revista Ingeniería Industrial* 19(01): 1-20. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2020.01>
- IGECEM (2021) Agenda estadística básica del Estado de México. Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México IGECEM. Toluca, Estado de México. https://igecem.edomex.gob.mx/indole_economica. Fecha de consulta: 16 de enero de 2025.
- INEGI (2022) Censo agropecuario (CA) 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>. Fecha de consulta: 22 de enero de 2025.
- INEGI (2023) Marco geoestadístico nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>. Fecha de consulta: 24 de enero 2025.
- Jayarathna CP, Agdas D, Dawes L, Yigitcanlar T (2021) Multi-objective optimization in supply chains. *Sustainability* 13: 1-31. <https://doi.org/10.3390/su132413617>
- Jouzdani J, Govindan K (2021) Sustainable perishable food supply chain design. *Journal of Cleaner Production* 278: 123060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123060>
- Juan PJI, Balderas PMA (2018) Estudio geográfico y ecológico de los huertos en el sur del Estado de México. En: Chávez MC, White OL, Juan PJI, Gutiérrez CJG (coords) *Conocimiento ambiental tradicional y manejo de recursos bioculturales en México. Análisis Geográfico Ecológico y Sociocultural*. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México. pp: 51-81.
- Madani B, Saihi A, Abdelfatah A (2024) Sustainable supply chain network design. *Sustainability* 16(8): 3226. <https://doi.org/10.3390/su16083226>

- ONU, CEPAL (2018) Agenda 2030 y los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Una Oportunidad para América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 91p.
- Orozco-Hernández ME, García-Fajardo B, Álvarez-Arteaga G, Mireles-Lezama P (2017) Tendencias del sector agrícola. *Quivera* 19: 99-121.
- Parmaksız D, Ülku MA, Weigand H (2024) Investigating rural logistics and transportation through the Lens of Quadruple Bottom Line Sustainability. *Logistics* 8(3): 81. <https://doi.org/10.3390/logistics8030081>
- Peña ULS, Rebollar RS, Callejas JN, Hernández MJ, Gómez TG (2015) Análisis de viabilidad económica para la producción comercial de aguacate Hass. *Revista Mexicana de Agronegocios* 36: 1325-1338.
- Pishvae M, Razmi J (2012) Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling* 36(8): 3433-3446. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.007>
- Quintero RJM, Omaña SJM, Sangerman JDM (2016) Modelo de transporte para la distribución de guayaba (*Psidium guajava* L.) en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 1335-1346.
- Quiroz-Flores J, Aguado-Rodríguez R, Zegarra-Aguinaga E, Collao-Díaz M, Flores-Pérez A (2024) Industry 4.0, circular economy and sustainability in the food industry: a literature review. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management* 6(1): 1-24. <https://doi.org/10.1108/IJIEOM-12-2022-0071>
- Rabbi MF (2025) Carbon emissions and SDG-12 in EU food systems. *Carbon Research* 4: 1-26. <https://doi.org/10.1007/s44246-025-00220-w>
- Ramírez RF, Vargas PL, Cárdenas O (2020a) La seguridad alimentaria: una revisión sistemática con análisis no convencional. *Revista Espacios* 41: 319-328. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n45p25>
- Ramírez JR, García SJA, García MR, Garza BLE, Escalona-Maurice MJ, Portillo VM (2020b) Regiones competitivas de maíz. *Interciencia* 45: 150-157.
- Ramírez JR, García SJA, Portillo VM, García MR (2023) Propuesta de agrupación de pequeños productores de maíz para alcanzar la eficiencia económica en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14: 339-350. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3036>.
- Rivera LS, Gutiérrez M, Pérez F (2019) Modelo de transporte para cacao. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 499-510. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1230>
- Rohmer S, Gerdessen G, Claassen G (2019) Sustainable supply chain design in the food system with dietary considerations: A multi-objective analysis. *European Journal of Operational Research* 273(3): 1149-1164. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.006>
- Rosendo CA, Herrera F, Vizcarra I, Baca N (2019) Desarrollo territorial rural. *Economía, Sociedad y Territorio* 18: 1243-1274.
- Salas AR (2017) Los migrantes retornados a la región de Tejupilco, Estado de México. *Ciencia ergo-sum* 24: 117-125. <https://doi.org/10.30878/ces.v24n2a3>
- SCT (2023) Traza tu ruta. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México. <http://www.sct.gob.mx/carreteras-v2/servicios/traza-tu-ruta/>. Fecha de consulta: 28 de enero de 2025.
- SE (2023) Data México. Secretaría de Economía. Ciudad de México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/>. Fecha de consulta: 29 de enero de 2025.
- Springmann M, Clark MA, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, de Vries W, Vermeulen SJ, Herrero M, Carlson KM, Jonell M, Troell M, DeClerck F, Gordon LJ, Zurayk R, Scarborough P, Rayner M, Loken B, Fanzo J, Willett W (2018) Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562(7728): 519-525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Torres TF, Rojas A (2018) Suelo agrícola en México. *Realidad, Datos y Espacio* 9: 137-155.

- Tubiello F, Rosenzweig C, Conchedda G, Karl K, Gütschow J, Xueyao P, Obli-Laryea G, Wanner N, Qiu S, De Barros J (2021) Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. *Environmental Research Letters* 16(6): 065007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>
- Vargas PAH, Romero FAJ, Suárez TCE (2022) Modelo de gestión logística para pequeñas empresas agrícolas. *Cienciamatra* 8(15): 4-22. <https://doi.org/10.35381/cm.v8i15.820>
- Wang G, Wang Y, Li, S, Yi Y, Li C, Shin C (2024) Sustainability in global agri-food supply chains. *Factors* 13: 2914. <https://doi.org/10.3390/foods13182914>
- Wang X, Wang M, Ruan J, Zhan H (2016) The multi-objective optimization for perishable food distribution route considering temporal-spatial distance. *Procedia Computer Science* 96: 1212-1220. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.165>
- Yao Q, Zhu S, Li Y (2022) Green vehicle-routing problem of fresh agricultural products considering carbon emission. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(14): 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148675>
- Yontar E, Ersöz S (2020) Food supply chain sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4: 1-21. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00068>
- Zhu S, Fu H, Li Y (2021) Optimization research on vehicle routing for fresh agricultural products based on the investment of freshness-keeping cost in the distribution process. *Sustainability* 13(14): 8110. <https://doi.org/10.3390/su13148110>